

**Evaluation der Energieeffizienz eines
strombasierten Infrarot-Heizsystems**

Hanna Iva Busse

Bachelorarbeit

ie3-16.042

Juni 2016

Bachelorarbeit für Frau Hanna Iva Busse

Evaluation der Energieeffizienz eines strombasierten Infrarot-Heizsystems

Im Rahmen der Bestrebungen zu einer erhöhten Energieeffizienz werden immer wieder neue Heizsysteme vorgestellt. Durch einen zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien werden auch strombasierte Heizsysteme wieder in Betracht gezogen. Neben Wärmepumpen sind direkte Infrarotstrahler am Markt verfügbar. Letztere könnten je nach Nutzungsfall aufgrund der direkten Strahlungsaussendung einen geringeren Energiebedarf gegenüber anderen Heizsystemen aufweisen.

Die hier gestellte Aufgabe ist es ein solches strombasiertes Infrarot-Heizsystem bezüglich der Energieeffizienz unter Berücksichtigung des Nutzerkomforts zu untersuchen und zu begutachten. Neben der Ermittlung energetischer Kennzahlen für den Betrieb solcher Geräte soll anhand einer Testsituation in einem Beispielraum der Betrieb unter realitätsnahen Bedingungen untersucht werden. Hierzu sind systematisch zielführende Testbedingungen zu erarbeiten, wobei unter anderem der Wärmebedarf des Raums sowie die Wärmeabgabe des Gerätes zu simulieren sind.

Anschließend sollen Probanden das Wärmeempfinden in dem Raum beurteilen, so dass abschließend eine Beurteilung der Energieeffizienz unter Berücksichtigung der thermischen Behaglichkeit getroffen werden kann.

Das Ziel der Arbeit ist es anhand der durchgeführten Tests gutachterlich zu beurteilen, ob derartige Geräte konventionelle Heizungen teilweise ergänzen oder komplett ersetzen können, wenn eine Steigerung der Energieeffizienz angestrebt wird. Ebenso sind die Kriterien abzuleiten, in welchen Auslegungs- und Nutzungsfällen ein derartiges System vorzuziehen oder abzulehnen ist.

Im Einzelnen sind folgende Bearbeitungsschritte durchzuführen:

- Literaturrecherche zu Aspekten der thermischen Behaglichkeit (vgl. „*Thermal Comfort*“)
- Test der Funktionstüchtigkeit und elektrischer Eigenschaften der Geräte
- Erarbeitung eines Testaufbaus zur Ermittlung der Energieeffizienz des Gerätes (Verbrauchsmessung, Temperaturmessung, etc.)
- Auswahl der Testumgebung (Referenzraum, typischer Raum, Wärmebedarfsermittlung für Versuchsraum, ggf. auch Versuch in Klimakammer)
- Berücksichtigung und Ermittlung subjektiver Kriterien (Komfortgefühl mit Probanden im Raum, z.B. kann bei Infrarot die Raumtemperatur durchschnittlich gesenkt werden oder nicht)

Im Anschluss an diese Arbeit ist in einem Vortrag über die Ergebnisse zu berichten.

Tag der Ausgabe:	07.03.2016
Tag der Abgabe:	07.06.2016
Zuständig:	M.Sc. Jonas Hinker Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz

Kurzfassung

Mit Blick auf die Energiewende drängen neue auf Energieeffizienz basierende Lösungen wie der Einbau von Infrarot-Heizungen auf den Markt. Diese aufgrund der von den Herstellern postulierten Einsparpotentiale versprochene Energieeffizienz von strombasierten Infrarot-Heizstrahlern ist in der vorliegenden Bachelorarbeit untersucht und evaluiert worden.

Nach einer Erläuterung des Aufbaus und der Funktionsweise von Infrarot-Heizsystemen sowie der mit Heizsystemen eng einhergehenden wärmetechnischen Grundlagen wurden die Geräte in einer ausgewählten Testumgebung hinsichtlich ihrer tatsächlichen Energieeffizienz untersucht. Dafür wurden Temperaturmessungen während des ausschließlichen Betriebs der Zentralheizung einerseits und der IR-Strahler andererseits durchgeführt, um bei der späteren Bewertung auf Vergleichswerte zurückgreifen zu können, wobei sich der größte Unterschied im *Temperaturverlauf* beim Betrieb der Strahler ergab. Ähnlich dazu verhielt sich der *Leistungsverlauf*, dessen charakteristische Aufnahmen und Abgaben die Temperaturkurven beeinflussten. Anhand der Messergebnisse wurde dann in Kombination mit Befragungen unter drei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen der Frage nachgegangen, inwiefern die gestellten IR-Strahler als energieeffizient oder ggf. sogar als effizienter im Vergleich zu konventionellen Heizsystemen gelten können.

Aufgrund dieses Unterschieds im Temperaturverlauf sowie bei Betrachtung der Kennlinien für verbrauchte Leistung zeigt sich, dass sich zwar durchaus Aspekte ergeben, die auch von anwesenden Personen als „behaglicher“ im Vergleich zu konventionellen Heizsystemen wahrgenommen werden, andere Umgebungen jedoch für die Anbringung der Heizstrahler besser geeignet wären, etwa gut gedämmte Räumen, in denen kein durchgängiger Heizbetrieb vonnöten ist.

Abstract

The energy revolution forces us to find energy-efficient solutions also in the field of heating. One solution is provided by infrared heaters that are marketed as highly energy efficient. In this thesis, two power-based radiant heaters produced by BioHeatPlus are investigated for their energy efficiency and evaluated in a critical

comparison with the manufacturer's specification. Temperature measurements were carried out in a test room first under normal conditions (central heating) and afterwards during the exclusive operation of the infrared -heaters. Whereas the latter did not show any metrological advantage compared to the convection heater, they achieved comparatively positive results in three surveys that were performed during the test phase. The performance values indicated by the manufacturer were constantly exceeded. Also the degree of efficiency of 96 % claimed by the manufacturer for the infrared heaters could not be confirmed by the measurements, presumably due to the fact that this can be achieved only in well insulated rooms. This, however, does not apply to the test environment. The improved heat distribution claimed by the manufacturer can only partially be substantiated through the temperature measurements or the results of the surveys. In a direct comparison of the two heating systems under consideration, a reduced heat-bridge formation can be identified for the infrared heaters, which, however, can be attributed to the increased outside temperatures. A more detailed comparative investigation of infrared and conventional heaters would require further measurements, which should include the building-physical data of the test room in particular and which should ideally be performed during the winter months.

All in all, on the basis of the present investigation results, no significant energy efficiency nor cost advantages arise from the exclusive use of power-based infrared heaters. Merely in rooms that are not constantly used or in which heat is required in some spots only, infrared-heating-systems can be reasonably used.

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz für sein Entgegenkommen bei der Suche nach einer meinen Wünschen entsprechenden Aufgabenstellung und dem Bereitstellen eines interessanten Themas bedanken.

In gleichem Maße danke ich meinem Betreuer Herrn Jonas Hinker, M. Sc. für die zahlreichen Gespräche und Anregungen. Dank gebührt auch Herrn Sven Seibt, Herrn Thomas Wohlfahrt und Herrn Rainer Förster der Firma BioHeatPlus, die mir vor allem bei handwerklichen Fragen behilflich waren.

Ein besonders großer Dank geht an Dennis Kubitzka, Dominic Klein und René Beckmann, die mir viele Denkanstöße gaben und ohne die diese Bachelorarbeit in der vorliegenden Form nie entstanden wäre.

Schließlich möchte ich mich auch bei meinen Eltern für ihre großartige Unterstützung während meines gesamten Studienverlaufs bedanken, für ihr stets offenes Ohr und die immer da gewesene Bereitschaft zu helfen.

Dortmund, 17.05.2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Theoretische Grundlagen	7
2.1	Elektrische Energie.....	7
2.2	Thermische Energie	7
2.3	Wärmeübertragung.....	8
2.3.1	Wärmeleitung	8
2.3.2	Konvektion	9
2.3.3	Wärme- und Infrarotstrahlung	10
2.4	Aspekte thermischer Behaglichkeit	13
2.4.1	Bekleidung.....	16
2.4.2	Tätigkeitsgrad	16
2.4.3	Raumlufttemperatur	17
2.4.4	Raumluft- vs. Oberflächentemperatur.....	17
2.4.5	Raumluft- vs. Fußboden- und Deckentemperatur.....	18
2.4.6	Raumlufttemperatur und relative Luftfeuchte	19
2.4.7	Raumlufttemperatur und Luftgeschwindigkeit.....	20
3	Das Testobjekt	21
3.1	Herstellendarstellung.....	21
3.2	Funktionsweise	22
4	Messung und Auswertung	24
4.1	Messwerkzeuge.....	24
4.2	Testumgebung.....	25
4.3	Nebenbedingungen.....	26
4.4	Messungen bei Nutzung der Konvektionsheizung.....	27

4.4.1	Messung 1: Temperaturerfassung am Wochenende.....	28
4.4.2	Messung 2: Temperaturerfassung unter der Woche	30
4.4.3	Messung 3: Temperaturerfassung am Wochenende.....	32
4.5	Messungen bei Nutzung der IR-Strahler	34
4.5.1	Messung 4: Temperaturerfassung.....	35
4.5.2	Messung 5: Leistungserfassung.....	39
4.5.3	Messung 6: Temperaturabsenkung	40
4.5.4	Messung 7: Wärmebildmessung.....	41
4.5.5	Messung 8: Betrachtung insgesamt.....	42
5	Befragung und Auswertung.....	47
5.1	Befragung 1: Normalbetrieb bei 21 °C	49
5.2	Befragung 2: Temperaturabsenkung auf 19 °C.....	49
5.3	Befragung 3: Ausgewählte männliche und weibliche Probanden.....	49
5.4	Auswertung der Befragungen.....	50
6	Diskussion	53
6.1	Überprüfung der Kenndaten.....	53
6.1.1	Stromverbrauch	53
6.1.2	Leistungsverbrauch und Energieverbrauch.....	53
6.2	Überprüfung der Hersteller-Thesen	54
6.2.1	Energieeffizienz.....	54
6.2.2	Energieverbrauch pro Stunde.....	55
6.2.3	Energiespartaktung	56
6.2.4	Temperaturempfinden	57
6.2.5	Wärmespeicher.....	58
6.2.6	Geeignete Positionierung.....	59

6.2.7	Vergleichende Kostenrechnung.....	60
6.3	Energiebedarfsunabhängige Bewertungskriterien	61
7	Zusammenfassung.....	62
8	Ausblick.....	65
9	Literaturverzeichnis	66
	Anhang A: Abbildungsverzeichnis.....	70
	Anhang B: Tabellenverzeichnis	73
	Anhang C: Behaglichkeitsfelder.....	75
	Anhang D: Dokumentationsgrafiken	77
	Anhang E: Datenblätter	83

Abkürzungen

ASR	Arbeitsstättenrichtlinie
CSV	Comfort Sensation Vote
EnEV	Energieeinsparverordnung
IR	Infrarot
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
TSV	Thermal Sensation Vote
UV	Ultraviolett

Formelzeichen

A	Fläche
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
h	Plancksches Wirkungsquantum
f	Frequenz
k_B	Boltzmann-Konstante
T	Temperatur
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante
λ	Wellenlänge
E	Energie
E_{th}	thermische Energie
$E_{Austausch}$	Strahlungsaustauschgrad
ε	Emissionsgrad
ϑ	Temperatur
ϑ_L	Lufttemperatur
ϑ_S	Strahlungstemperatur
$\vartheta_{S,as}$	Strahlungstemperatur-Asymmetrie
ϑ_{op}	operative Temperatur
v_L	Luftgeschwindigkeit
Λ	Wärmedurchlasszahl
\dot{q}_M	spezifische Gesamtwärmeentwicklung des Menschen

\dot{q}_A	Atmung als Prozess des Wärmeabgabestromes
\dot{q}_V	Verdunstung als Prozess des Wärmeabgabestromes
\dot{q}_{KI}	spezifischer Wärmestrom infolge Wärmeleitung (Kleidung)
\dot{q}_K	Konvektion als Prozess des Wärmeabgabestromes
\dot{q}_S	Strahlung als Prozess des Wärmeabgabestromes
clo	Wärmeleitwiderstand (engl: <i>clothing</i>)
met	Stoffwechselrate (engl.: <i>metabolic rate</i>)

1 Einleitung

Die stark ansteigenden Kosten für fossile Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas rufen, auch mit Blick auf die Energiewende zu einem Um- und Überdenken hinsichtlich des individuellen Energieverbrauchs auf. Der Heizenergieverbrauch fällt dabei mit einem Anteil von 76 % des kompletten Energieverbrauchs eines Haushalts besonders schwer ins Gewicht (siehe Abbildung 1.1).

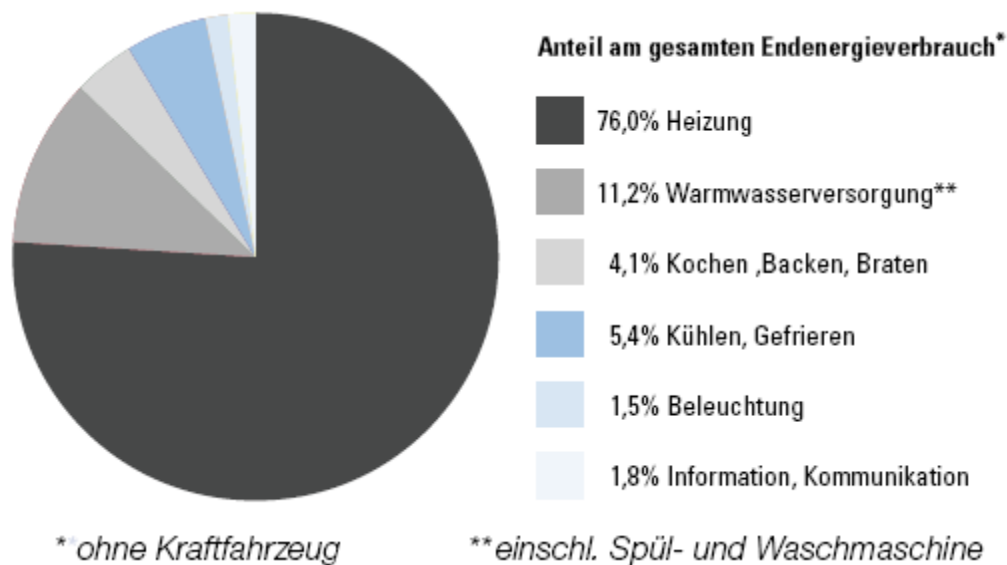


Abbildung 1.1: Energieverbrauch im Haushalt [1]

Neben der Möglichkeit, mit finanzieller Unterstützung des Staates eine Sanierung der gewünschten Örtlichkeit vorzunehmen, bietet sich auch der Vergleich verschiedener Heizsysteme miteinander an. Seit der Verabschiedung der Energiesparverordnung (EnEV) [2] im Jahr 2007 wird vermehrt für den Einbau von Infrarot-Heizungen als energieeffiziente Lösung geworben, wobei neben einer angenehmen Raumtemperatur Einsparpotenziale von bis zu 30 % versprochen werden [3].

Der Begriff „Effizienz“ kennzeichnet das „Verhältnis zwischen eingesetzten Mitteln und Wirkung“ [4], d.h. die Minimierung eingesetzter Mittel und die Maximierung des Ergebnisses stehen in Abhängigkeit zueinander. Wird also von Energieeffizienz gesprochen, gilt nach [4] als Voraussetzung, „den Energieeinsatz in ein[em] System zur Erbringung der Dienstleistung zu reduzieren“.

Anhand zweier von der Firma BioHeatPlus bereitgestellter strombasierter Infrarot-Heizgeräte soll eben jener Aspekt der versprochenen Energieeffizienz durch Prüfung der vom Hersteller auf der seiner Internetseite postulierten Thesen überprüft werden. Zum einen werden dafür die Raumtemperaturen einer ausgewählten Testumgebung gemessen, die sich sowohl bei der Nutzung der Zentralheizung als auch beim ausschließlichen Betrieb der IR-Heizsysteme ergeben, wobei hier auf besonders kritische Stellen eines Raumes (Fenster, Ecken etc.) geachtet wird. Zum anderen sollen durch Verbrauchsmessungen die durchschnittliche sowie die maximale Wirkleistung eines Gerätes unter erschwerten Bedingungen bestimmt werden.

Während und nach diesen Messungen werden außerdem zur Untersuchung der subjektiven Einschätzungen regelmäßig wie auch einmalig anwesende Probanden mithilfe eines Fragebogens zu ihrer Temperatur- und Behaglichkeitswahrnehmung im Testraum, einem Büro, befragt.

Für die Untersuchung wird von der Annahme ausgegangen, dass es sich bei dem Strom um ein Produkt handelt, das gänzlich aus erneuerbaren Quellen generiert wird, d.h. einen Primärenergiefaktor von 0,0 trägt und somit in die Kategorie Umweltenergie fällt.

Die sich aus der Problemstellung ergebenden Leitfragen sind dabei:

- Wann ist ein Gerät energieeffizient?
- Was sind die Einflussgrößen des Energieverbrauchs?
- Ab wann spricht man von thermischem Komfort?

2 Theoretische Grundlagen

In der Physik ist Wärme Energie, die aufgrund einer Temperaturdifferenz zwischen zwei Systemen übertragen wird. Der Begriff „Wärme“ wird oftmals mit „thermischer Energie“ verwechselt. Daher soll im Folgenden auf die zwei in dieser Arbeit relevanten Energieformen – elektrische und thermische Energie – sowie auf die wärmetechnischen Grundlagen bezüglich der Wärmeübertragung eingegangen werden.

2.1 Elektrische Energie

Allgemein unter dem Begriff „Strom“ bekannt dient elektrische Energie der Erzeugung von Licht und Wärme, dem Antrieb von Motoren und der Übertragung von Informationen. Gemessen wird die elektrische Energie in Joule (J) bzw. Wattsekunden (Ws). Während sich die Größe der Einheit im Haushalt üblicherweise im Kilowattstunden-Bereich bewegt, orientiert sich die Industrie an Mega-, Giga- und Terrawattstunden.

Der Prozess der Energiegewinnung basiert auf der Umwandlung von Primärenergie in elektrische Energie. Deutschland stützt sich noch hauptsächlich auf fossile Energieträger wie Kohle, Öl und Gas. Aufgrund ihres begrenzten Vorkommens und der klimaschädlichen Emissionsbilanz geht der Trend jedoch immer mehr in Richtung regenerativer Energieträger wie Sonnenlicht, Wind und Wasser [5].

2.2 Thermische Energie

Thermische Energie, die auch als „Wärmeenergie“ bezeichnet wird, ist definiert als

$$E_{th} = m \cdot c \cdot T \quad (2.1)$$

wobei m die Masse, c die spezifische Wärmekapazität und T die absolute Temperatur ist. Als eine der vielen Erscheinungsformen stellt die thermische Energie eine in der gesamten ungeordneten Bewegung der Atome oder Moleküle eines Stoffes gespeicherte Energie dar und beruht somit auf der Kombination aus kinetischer, Rotations- und Schwingungsenergie dieser Atome und Moleküle. Der

proportionale Zusammenhang zwischen Wärme und kinetischer Energie führt zu einer Erhöhung der mittleren kinetischen wie auch thermischen Energie bei Wärmezufuhr; umgekehrt führt eine Wärmeabfuhr zu einer Verringerung.

Beim Zusammenführen zweier Systeme unterschiedlicher Temperatur findet mittels Wärmeaustausch eine Angleichung statt: Damit folgt es dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, wonach die thermische Energie stets vom System höherer Temperatur ins System niedrigerer Temperatur übergeht, bis sich beide Systeme im thermischen Gleichgewicht befinden [6].

2.3 Wärmeübertragung

In der Literatur wird allgemein von vier unterschiedlichen Arten der Wärmeübertragung gesprochen: Wärmeleitung, Wärmestrahlung, erzwungene und freie Konvektion. Bei genauerer Betrachtung stellt sich jedoch heraus, dass Konvektion einen Unterpunkt der Wärmeleitung darstellt [6].

2.3.1 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung stellt den Prozess hin zum thermischen Gleichgewicht mittels Austausch kinetischer Energie zwischen Molekülen oder Atomen dar. Sie entsteht in Stoffen, die einen Temperaturgradienten aufweisen, d.h. deren Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt. Bei der Berechnung der Wärmeleitung muss zwischen ruhenden Stoffen, zu denen feste Stoffe und ruhende Fluide zählen, und strömenden Fluiden unterschieden werden.

Den einfachsten Fall stellt die Berechnung der Wärmeleitung in ruhenden Stoffen dar, da hier lediglich Abhängigkeiten hinsichtlich der Temperaturgradienten und Stoffeigenschaften vorliegen. Als Konsequenz eines Temperaturunterschieds findet dabei ein Transport thermischer Energie statt. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik bleibt die Energie konstant, sofern es sich um ein abgeschlossenes System handelt.

Wird dagegen von einer festen Wand und einem strömenden Fluid ausgegangen, handelt es sich um eine Konvektion [7].

2.3.2 Konvektion

Als Konvektion wird der Wärmeübergang zwischen einem festen Stoff und einem strömenden Fluid bezeichnet. In diesem Fall kommt den bewegten freien Elektronen des Fluids die Aufgabe zu, die thermische Energie mit sich zu führen und so den Wärmetransport zu ermöglichen.

Bei der Berechnung wird zwischen erzwungener Konvektion infolge eines Druckunterschieds und freier Konvektion unterschieden. Die freie oder auch Naturkonvektion entsteht durch schwerkraftbedingte Auftriebskräfte, die durch Temperatur- und dadurch verursachte Dichteunterschiede hervorgerufen werden.

Die Heizungs- und Klimatechnik macht sich vor allem die freie Konvektion zunutze. Heutzutage gibt es in fast jedem Haushalt eine Warmwasserheizung. Unter dem Aspekt der freien Konvektion ist insbesondere die Schwerkraftheizung von Bedeutung, deren Aufbau auf einem Brenner basiert, in dem sich ein wassergefüllter Kessel befindet. Bei Aktivierung des Brenners kommt es zur Erhitzung der Kesselwände und des im Kessel befindlichen Wassers. Dadurch werden zunächst die unteren Wasserschichten erwärmt, die dann aufgrund der geringeren Dichte nach oben steigen. Das kältere Wasser sinkt unterdessen nach unten, wird erwärmt und steigt wieder nach oben.

Mittels Wärmeleitung wird die Wärmeenergie an die Umgebung abgegeben. Die kalte Raumluft als Transportmedium wird am Heizkörper erwärmt und steigt als erwärmte Luft auf. Diese stößt wiederum an die ihrerseits kalte Decke und strömt an der gegenüberliegenden Raumseite wieder nach unten. Als Resultat ergibt sich ein Kreislauf, der dazu führt, dass der Innenraum in kurzer Zeit erwärmt wird. Wichtig ist dabei, dass im Gegensatz zur Wärmestrahlung nicht die Objekte selbst, sondern lediglich die Luft aufgeheizt wird. Durch die Art der Wärmeleitung ergibt sich bei dieser Heizungsart ein hohes Temperaturgefälle, da sich die warme Luft hauptsächlich im oberen Bereich, die kalte dagegen eher im Fußbereich befindet [8, 9].

2.3.3 Wärme- und Infrarotstrahlung

Die Infrarotstrahlung ist Teil des elektromagnetischen Spektrums, d.h. der Gesamtheit aller elektromagnetischen Wellen unterschiedlicher Wellenlängen. Das Spektrum lässt sich in verschiedene Bereiche unterteilen, wie z. B. Gamma-, Röntgen-, ultraviolette (UV), sichtbare, infrarote (IR), Mikrowellen- und Radiowellenstrahlung (Abbildung 2.1). UV-Strahlung umfasst den Spektralbereich zwischen 100 nm und 380 nm, sichtbare Strahlung den zwischen 380 nm und 780 nm und IR-Strahlung den Spektralbereich zwischen 780 nm und 1 mm [10].

Elektromagnetische Wellen benötigen kein Medium, um sich auszubreiten. Sie bewegen sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit ($c_0 \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) fort, in der Materie ist ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit vermindert.

In mancher Hinsicht verhalten sich elektromagnetische Wellen nicht wie Wellen, sondern wie ein Strom von Teilchen, die Photonen. Diese Betrachtungsweise ist nötig, um physikalische Phänomene wie den photoelektrischen Effekt zu verstehen. Die Energie E eines Photons ist proportional zu seiner Frequenz f :

$$E = h \cdot f \quad (2.2)$$

Die Konstante h ist dabei das Plancksche Wirkungsquantum ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$). Nur ein kleiner Teil des elektromagnetischen Spektrums ist für den Menschen direkt wahrnehmbar: das mit den Augen wahrnehmbare sichtbare Licht und die mit den Wärmerezeptoren der Haut wahrnehmbare Wärmestrahlung (siehe Abbildung 2.1).

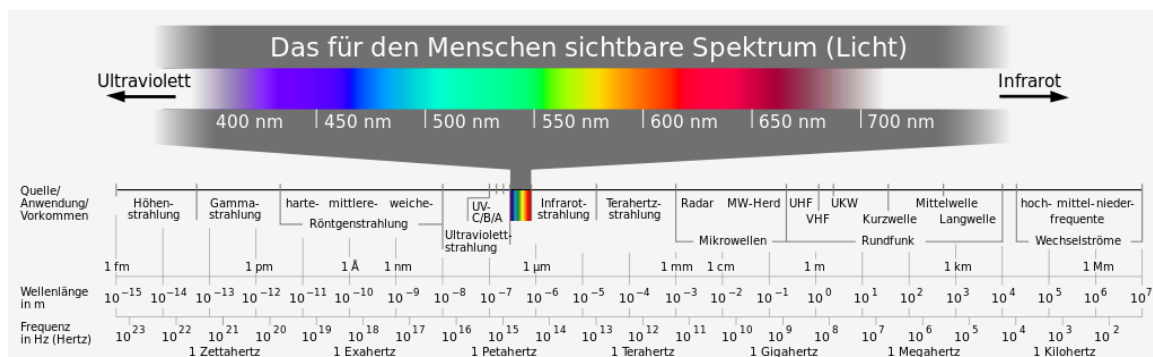


Abbildung 2.1: Elektromagnetisches Spektrum [11]

Wärmestrahlung ist elektromagnetische Strahlung, die jeder Körper abhängig von seiner Temperatur emittiert. Die höchste Emission zeigt der ideale „Schwarze Körper“, eine idealisierte thermische Strahlungsquelle, die auftreffende elektromagnetische Strahlung vollständig absorbiert. Gleichzeitig strahlt der Schwarze Körper Wärme ab, deren Intensität und spektrale Verteilung nur von der Temperatur abhängig sind. Das Plancksche Strahlungsgesetz gibt die Verteilung der elektromagnetischen Energie der thermischen Strahlung eines Schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge oder der Frequenz der Strahlung an. Abbildung 2.2 zeigt die spektrale spezifische Ausstrahlung und die spektrale Strahldichte, die bei gegebener Wellenlänge und Temperatur von einem idealen Schwarzen Körper nach dem Planckschen Strahlungsgesetz emittiert werden.

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (2.3)$$

k_B ist hier die Boltzmann-Konstante ($k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$).

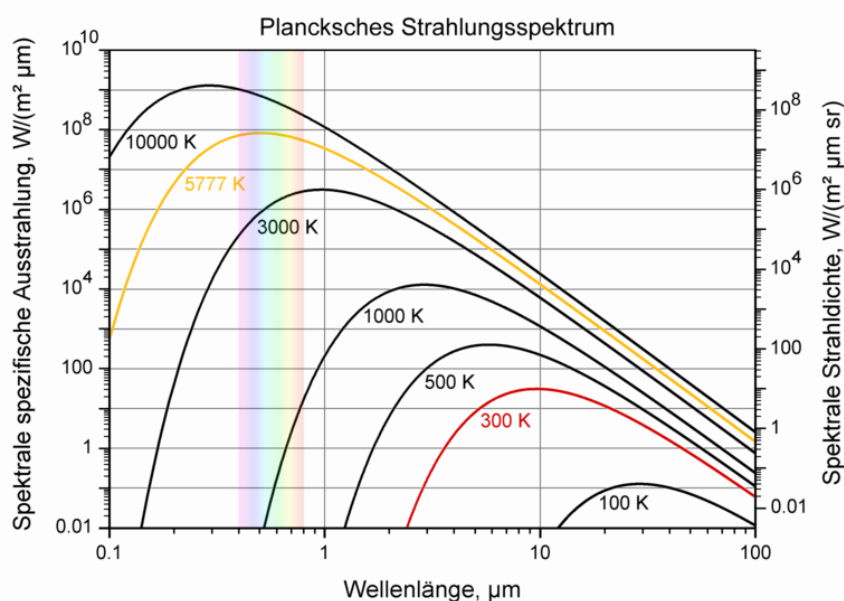


Abbildung 2.2: Plancksches Strahlungsspektrum [12]

Wie Abbildung 2.2 zu entnehmen ist, besitzt jede einer bestimmten Temperatur zugehörige Kurve ein Maximum. Die Lage des Maximums verschiebt sich mit zunehmender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen (Wiensches Verschiebungsgesetz). Da das Strahlungsmaximum bei üblichen

Umgebungstemperaturen im IR-Spektralbereich liegt, wird unter Wärmestrahlung meist nur die nicht sichtbare IR-Strahlung verstanden. Strahlungsmaxima können jedoch auch im sichtbaren und im UV-Spektralbereich liegen.

Gleichzeitig nimmt die gesamte spezifische Ausstrahlung, die sich aus Integration über spektrale spezifische Ausstrahlung ergibt, mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur T zu: Das Stefan-Boltzmann-Gesetz gibt an, welche Strahlungsleistung P ein Schwarzer Körper der Fläche A und der absoluten Temperatur T aussendet:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4. \quad (2.4)$$

Die Konstante σ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

Ausgehend von der abgestrahlten Leistung eines Körpers P nach (2.4) lässt sich der Strahlungsaustausch zwischen zwei Körpern mittels

$$P = \sigma \cdot A \cdot E \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.5)$$

berechnen. Der Strahlungsaustauschgrad E hängt dabei laut (2.6) von den beiden Emissionsgraden ε_1 und ε_2 ab.

$$E_{Austausch} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (2.6)$$

Das reale Verhalten ergibt sich allerdings durch Wechselwirkungen aller Körper. Durch den Strahlungsaustausch und die damit verbundene Absorption an der Oberfläche der jeweils anderen Körper kommt es zu einer verstärkten Erwärmung sowie Abstrahlung.

Da von jedem Körper eine gewisse Strahlung ausgeht, existiert bei der Wärmestrahlung nicht nur *eine* Richtwirkung – die vom System mit der höheren Temperatur hin zu jenem mit der niedrigeren Temperatur –, sondern ein Energietransport in beide Richtungen. Insgesamt kann jedoch von einem Wärmestrom zum kälteren System hin ausgegangen werden, da dieser betragsmäßig immer größer sein wird [13, 14].

2.4 Aspekte thermischer Behaglichkeit

Eng verbunden mit dem Begriff „Heizen“ ist die Verfügbarkeit thermisch komfortabler Aufenthaltsräume, wie sie in der auf Ole Fangers Arbeiten aus dem Jahr 1970 [15] basierenden internationalen Norm DIN EN ISO 7730 [16] definiert werden. Neben der subjektiven Bewertung des Raumklimas durch Probandenbefragungen in einer gegebenen Testumgebung bietet die objektive Bewertung nach Fanger einen „Zusammenhang zwischen dem physiologischen Geschehen im Körper und den physikalischen Wechselwirkungen des Körpers mit der Umwelt“ [17], ausgedrückt durch die Formel (2.7).

$$\dot{q}_M - \dot{q}_A - \dot{q}_V = \dot{q}_{kl} = \dot{q}_K + \dot{q}_S \quad (2.7)$$

Diese Formel wurde durch Untersuchungen und einer statistischen Verbindung der Ergebnisse von Befragungen großer Probandengruppen mit Behaglichkeitsurteilen gefunden und ermöglicht die Bestimmung des Wärmebilanzhaushaltes eines Körpers. Ergibt sich nach Einsetzen der entsprechenden Parameter ein Wert von Null, d.h. Wärmeerzeugung und -verlust sind identisch, befindet sich der betrachtete Körper im thermischen Gleichgewicht. Ferner wird von thermischem Komfort gesprochen, wenn dieser Zustand ohne hohen Regelungsaufwand aufrechterhalten werden kann.

Tabelle 2.1: Bewertungsskala

+3	heiß
+2	warm
+1	leicht warm
0	neutral
-1	leicht kalt
-2	kühl
-3	kalt

Die DIN EN ISO 7730 legt als Ausgangsbedingung fest, „dass eine gefühlte Temperatur im Gebäude von 22°C überall im Raum erreicht werden kann“ [siehe auch 4]. Basierend auf der Wärmebilanzgleichung (2.7) lassen sich im Folgenden der PMV- und PPD-Wert – auch bekannt als Fangersche Komfortgrößen – zur objektiv-analytischen Bestimmung der thermischen Behaglichkeit berechnen [18]. Der PPD-Index (engl.: *predicted percentage dissatisfied*) gibt den voraussichtlichen prozentualen Anteil einer Personengruppe an, der hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit in einem Raum unzufrieden ist. Im Zusammenhang damit stellt der PMV-Wert (engl.: *predicted mean vote*) die zu erwartende mittlere Bewertung der Raumtemperatur dar. Er liefert gemäß Tabelle

2.1 und Abbildung 2.3 einen dimensionsfreien Maßstab und kann schließlich zur Berechnung des PPD-Werts mittels

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2} \quad (2.8)$$

genutzt werden [16].

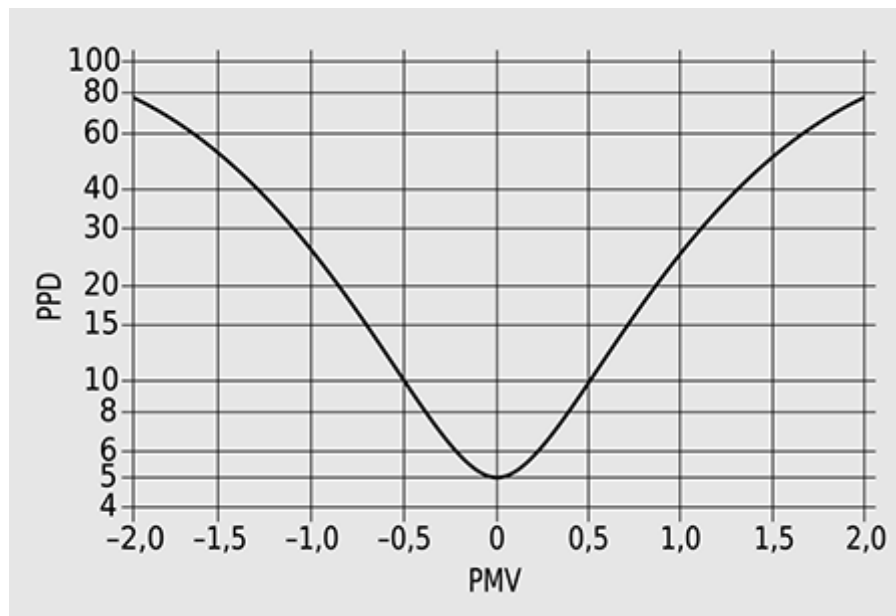


Abbildung 2.3: Zusammenhang zwischen dem vorausgesagten mittleren Votum (PMV) und dem Prozentsatz Unzufriedener (PPD) nach [16]

Nach DIN EN ISO 7730 wird die thermische Behaglichkeit als „das Gefühl, das Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima ausdrückt“, definiert. Um diese angemessen bewerten zu können, werden zusätzlich zu PMV und PPD die Begriffe Comfort Sensation Vote (CSV) und Thermal Sensation Vote (TSV) eingeführt, um in späteren Befragungen die Bewertungen bezüglich der Behaglichkeit und des Temperaturempfindens einander gegenüberstellen und insbesondere auf einzelne Personen aussagekräftige Ergebnisse erzielen zu können. So wäre es beispielsweise denkbar, dass die Raumtemperatur generell als „warm“ bewertet wird. Während Proband X diese aber als „behaglich“ empfindet, präferiert Proband Y kühlere Temperaturen und empfindet die gegebene Raumtemperatur somit als „leicht unbehaglich“.

Tabelle 2.2: Bewertung CSV nach [34]

0	behaglich
-1	leicht unbehaglich
-2	unbehaglich
-3	sehr unbehaglich
-4	intolerabel

Die Skala, die zur Bewertung des Temperaturempfindens (TSV) entwickelt wurde, beruht auf den Ausprägungen in Tabelle 2.1, die CSV-Skala auf denen in Tabelle 2.2. Dennoch finden sich in verschiedenen Studien unterschiedliche Skalen für CSV und TSV. Während [19] den TSV in neun und den CSV in sieben Schritte unterteilt, nutzt [20] sieben Bewertungsschritte für den TSV und lediglich vier für den CSV. Laut einer dieser Studien aus dem Jahr 2006 wird der TSV-Wert stark von der Umgebungstemperatur beeinflusst und weist außerdem eine im Durchschnitt lineare Abhängigkeit zum CSV-Wert auf [19].

Durch das Darstellen von PMV- und PPD-Werten in Abhängigkeit voneinander sowie durch die zusätzliche Betrachtung der CSV- und TSV-Werte ergibt sich die Möglichkeit, ein Heizsystem – unter Berücksichtigung aller Eigenschaften des zu untersuchenden thermischen Komforts – auf seine Effektivität und infolgedessen auch auf seine Effizienz im Hinblick auf Behaglichkeit zu beurteilen. Gemäß Fukazawa et al. [19] und Frank 1975 [21] wird die thermische Behaglichkeit primär von den folgenden Rahmenbedingungen beeinflusst:

- Bekleidung,
- Tätigkeitsgrad,
- Raumlufttemperatur,
- Temperatur der Raumumschließungsflächen (Strahlungstemperatur),
- relative Luftfeuchte,
- Luftbewegung in Körfernähe.

In Abbildung 2.4 werden alle ins Gewicht fallenden Größen in intermediäre, physiologische und physikalische Bedingungen sowie primäre, sekundäre und zusätzliche Faktoren unterteilt.

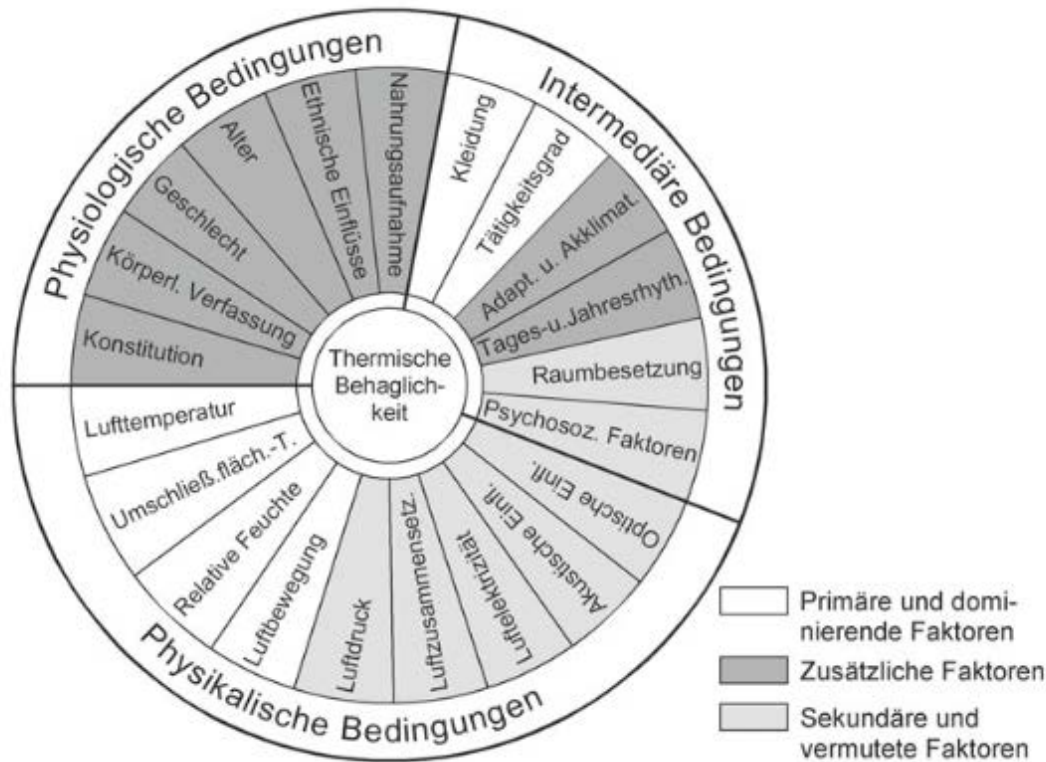


Abbildung 2.4: Thermische Behaglichkeit in Abhängigkeit von physiologischen, intermediären und physikalischen Einflüssen [22]

2.4.1 Bekleidung

Aufgrund der Reduzierung der Wärmeabgabe des Körpers durch das Tragen von Kleidung wird unter Berücksichtigung der Kleidungsart der thermische Widerstand angegeben. Dabei gilt der von Gagge definierte Clo-Unit-Maßstab, bei dem 1 clo = 0,18 m²h grad/kcal eine Wärmedurchlasszahl von $\Lambda = 0,155 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ zugeordnet wird. Dieser Wert kann beispielsweise von „normaler“ Bürokleidung erreicht werden.

2.4.2 Tätigkeitsgrad

Mit der Beziehung 1 met (engl.: *metabolic rate*) = 58 W/m² wird die aus dem Stoffwechsel resultierende mittlere Wärmeabgabe an die Umgebung in Abhängigkeit von der momentan ausgeführten Tätigkeit angegeben. Je höher dabei der Grad der Aktivität ist, umso höher ist auch die Stoffwechselrate. Die wichtigsten Tätigkeitsgrade und ihre dazugehörigen Stoffwechselraten sind der Tabelle 2.3 nach

[22] zu entnehmen. Für weitere Unterscheidungen wird auf die DIN EN ISO 8996 [23] verwiesen.

Tabelle 2.3: Anhaltswerte für die Stoffwechselrate des Körpers nach [22]

Körperliche Tätigkeit	Stoffwechselrate in met
Entspannt sitzen	1,0
Sitzende Tätigkeit (Büro, Wohnung, Schule, Labor)	1,2
Stehende, leichte Tätigkeit (Einkaufen, Labor, leichte Industriearbeit)	1,6
Stehende, mittelschwere Tätigkeit (Verkaufstätigkeit, Hausarbeit, Maschinenbedienung)	2,0

Da die vorliegende Arbeit auf die Installation von IR-Strahlern in Wohn- und Arbeitsräumen ausgelegt ist, in denen sich die Körper der sich darin befindlichen Personen zum größten Teil in Ruhe befinden, reduziert sich die mögliche Auswahl der Tätigkeitsgrade und damit auch das Intervall der Werte der Wärmeproduktion (1,2 met bis 4,0 met nach ASHRAE) [22].

2.4.3 Raumlufthtemperatur

Gemäß der Energieeinsparverordnung werden Wohngebäude bei Innentemperaturen von 19 °C miteinander verglichen und bewertet. Bezüglich zeitgemäßer Wohngebäude gelten in den unterschiedlichen Wohnbereichen laut [22] in Wohn-, Ess-, Kinder- und Arbeitszimmer Temperaturintervalle von 20 °C bis 22 °C, wohingegen das Badezimmer mit 22 °C bis 24 °C zur Wahrung der thermischen Behaglichkeit wärmer gehalten werden sollte.

2.4.4 Raumluft- vs. Oberflächentemperatur

Unter realen Bedingungen hängt die thermische Behaglichkeit nach der Fanger-Gleichung (2.7) nur geringfügig von der relativen Luftfeuchtigkeit und eventuell auftretenden Zuglufterscheinungen ab. Sie orientiert sich hauptsächlich an dem Zusammenwirken zwischen Lufttemperatur ϑ_L und mittlerer Strahlungstemperatur

der den Raum begrenzenden Oberflächen $\overline{\vartheta}_S$. Durch Bilden des Mittelwerts aus der Summe dieser beiden Werte ergibt sich die sog. „Empfindungs-“ oder „operative Temperatur“ ϑ_{op} :

$$\vartheta_{op} = \frac{\vartheta_L + \overline{\vartheta}_S}{2} \quad (2.9)$$

Wie aus dieser Formel zu entnehmen ist, besteht durchaus die Möglichkeit, durch Änderung der Lufttemperatur Schwankungen der mittleren Strahlungstemperatur auszugleichen und umgekehrt.

Gemäß [16] dürfen die Schwankungen der operativen Temperatur $\vartheta_{op} \leq 1,1$ K nicht überschreiten. Zusätzlich ist anzumerken, dass diese Beziehung lediglich bei Aktivitäten mit niedrigen Tätigkeitsgraden, für innenraumtypische Kleidung sowie niedrige Raumlufgeschwindigkeiten gilt. In Abbildung C.1 werden unter den Bedingungen

- Relative Feuchte der Raumluf: 30 bis 70 %
- Luftbewegung: 0 bis 0,2 m/s (ruhende Luft)
- Entspanntes Sitzen (Stoffwechselrate: 1,2 met)
- Typische Bekleidung für Innenräume (Wärmewiderstand: 1,0 clo)

durch Auftragen der mittleren Oberflächentemperatur der Raumumschließungsflächen über der Raumlufemperatur Behaglichkeitsfelder definiert. Abgesehen von den Behaglichkeitsfeldern konzentrierte sich Fanger [15] auf die Ausarbeitung optimaler Behaglichkeitslinien, bei denen von einer geringen Anzahl unzufriedener Personen auszugehen ist.

2.4.5 Raumluf- vs. Fußboden- und Deckentemperatur

Nach der DIN EN ISO 7730 gelten 24 °C Fußbodentemperatur als optimal; zusätzlich schreibt die DIN EN 13779 [24] vor, dass die Luftschicht, die sich 0,1 m über dem Boden befindet, die 21 °C-Marke nicht unterschreiten darf. Während über eine Mindesttemperatur von etwa 17 °C bei bekleideten Füßen weitestgehend Einigkeit herrscht, gibt es keine fest anerkannten Werte bzgl. der Obergrenze. So gilt nach

[25] bereits eine Fußbodentemperatur von 25 °C als bedenklich, [26] dagegen definiert 30 °C als höchstzulässige Temperatur.

Aufgrund dieser Unsicherheiten wird mit Abbildung C.2 a) lediglich der Behaglichkeitsbereich für unbeheizte Böden aufgezeigt, die nach [27] für Räumlichkeiten mit 30-70 % relativer Luftfeuchte und einer Luftbewegung von 0-0,2 m/s gelten.

Vor der Behaglichkeitsbewertung deckenbeheizter Wohn- und Büroräume sind der Abstand zwischen dem Kopf des Versuchsteilnehmers und der Decke sowie der Anteil der Heizfläche an dieser festzustellen. Abbildung C.2 b) verdeutlicht die Behaglichkeitsfelder des Wertepaares Luft- vs. Deckentemperatur, die für einen Raum mit einer Luftfeuchte von 30-70 % und einer Luftbewegung von 0-0,2 m/s definiert wurden.

Zudem wird durch [16] vorgeschrieben, dass für die Strahlungstemperatur-Asymmetrie – d.h. die Differenz der Strahlungstemperaturen zweier gegenüber voneinander liegender Halbräume – zwischen Decken- und Bodenbereich gelten muss: $|\Delta\theta_{s,as}| \leq 5$ K. Dabei ist allerdings zu bedenken, dass die Temperaturdifferenz zwischen Kopfhöhe (1,1 m) und Fußboden (0,1 m Höhe) einer sitzenden Person nach DIN EN 13779 nicht mehr als 2 K betragen darf.

2.4.6 Raumlufttemperatur und relative Luftfeuchte

Im Vergleich zu den zuvor angesprochenen Randbedingungen wird der Einfluss der relativen Luftfeuchte in der Literatur oftmals überbewertet. Durch zahlreiche Versuche an Probanden – als Beispiel sei hier die Versuchsreihe von Koch et al. (1960) [28] zu nennen – hat sich herausgestellt, dass der menschliche Körper eine Änderung der Luftfeuchte in einem Intervall von etwa 35% bis 70% kaum bis gar nicht wahrnimmt, so lange er sich in der Behaglichkeitszone von 19 °C bis 23 °C befindet. Eine Luftfeuchte von über 70 % ist, neben dem aufkommenden Schwülegefühl, aus gesundheitlichen Gründen zu vermeiden, da ansonsten schlimmstenfalls Kreislaufprobleme auftreten können. Auch eine Unterschreitung der 35 %-Grenze birgt wegen der möglichen Austrocknung der Schleimhäute in den Atmungsorganen eine Gefahr. Die Temperatur- und Feuchtebereiche, die als

behaglich empfunden werden, sind Abbildung C.3 zu entnehmen. Die Grenzen verschieben sich je nach dem Grad der Beschäftigung und der Luftgeschwindigkeit. Im vorliegenden Fall gelten die Bereiche für eine sitzende Tätigkeit und bei einer Luftgeschwindigkeit von 0,2 m/s.

2.4.7 Raumlufttemperatur und Luftgeschwindigkeit

Bis auf die für den Wärmetransport zwingend notwendige Konvektion ist bereits eine leicht erhöhte Luftgeschwindigkeit von über 0,2 m/s zu vermeiden. Wie Abbildung C.4 zu entnehmen ist, steigt mit steigender Temperatur auch die als angenehm empfundene Luftgeschwindigkeit. Trotz dieser definierten Grenzen kann es bei temperaturempfindlichen Personen durchaus zur Verschiebung der akzeptablen Luftgeschwindigkeit kommen.

In einem Wohn- oder Büroraum muss nach DIN EN ISO 7730 $|v_L| \leq 0,1$ m/s gelten. Mit Hilfe von Simulationen konnte Pfluger [29] beweisen, dass dieser Wert auch in luftdichten Räumen mit Oberflächentemperaturen bis 4,2 K nicht überschritten wird.

3 Das Testobjekt

Um ihre Energieeffizienz zu prüfen, stellte die Firma BioHeatPlus dem Lehrstuhl ie3 der Fakultät Elektrotechnik der TU Dortmund zwei Heizstrahler inklusive Raumthermostat und Funkschalter zur Verfügung. Auf der Firmeninternetseite werden die Kunden über den Aufbau, die Funktionsweise und vorteilhafte Eigenschaften der Geräte aufgeklärt.

3.1 Herstellerdarstellung

Die Testobjekte, die auf deutsch-patentierter Technik basieren, wurden von der Firma BioHeatPlus hergestellt, die neben einem sich einstellenden „Sommerfeeling“

- ein natürliches, gesundes Raumklima,
- klimaneutrale Wärme,
- geringe Verbrauchskosten und eine
- langjährige Garantie

verspricht [30]. Das Heizprinzip der Geräte beruht auf Sonnenwärme im Infrarotbereich. Die Wärmestrahlen werden an Hindernissen wie Wänden oder auch menschlicher Haut teilweise absorbiert und in Wärme umgewandelt. In einem geschlossenen Raum bedeutet dies, dass die Umschließungsflächen als Wärmespeicher dienen, die Wärme zurückstrahlen und somit zu einer gleichmäßigen Erwärmung ohne kalt bleibende Bereiche beitragen.

Damit unterscheidet sich BioHeatPlus von konventionellen Heizsystemen, die ihre Energie aus Gas, Öl oder Holz beziehen und die auf Konvektion beruhen. Bei der Konvektion wird im Gegensatz zur Wärmestrahlung nicht die Raumhülle sondern die Luft im Raum erwärmt. Da die Luft sogar in vielen Fällen als Isolator fungiert und somit ein schlechter Wärmeleiter ist, muss die Umgebung durchgängig beheizt werden, um thermische Behaglichkeit zu sichern. Die Luftzirkulation bewirkt das Aufsteigen der warmen Luft, so dass sich die Decke als wärmster Bereich herausbildet. Um gerade dies zu vermeiden, soll „[d]ie besondere Anordnung der Kreuzwellen-Infrarotheizelemente zusammen mit der Installation des BioHeatPlus

[...] für eine flächendeckende Erwärmung des Raumes [sorgen]“ und „durch die gleichmäßige Wärmeverteilung [...] die Luftzirkulation [minimieren]“ [30].

Als positiv werden vor allem die Minimierung des Energieverlustes sowie der Wegfall von Abgas-, Bereitschafts- und Verteilungsverlusten hervorgehoben. Letztere sind bei Zentralheizungen nicht zu umgehen und führen nach [30] zu einem Energieverlust von bis zu 15 %, ohne dabei einen Beitrag zur Heizwärme zu leisten.

Bezüglich des Aufbaus macht sich BioHeatPlus das Prinzip der vom Hersteller so genannten „Kreuzwellen“ zunutze. Wie der Internetseite der Firma zu entnehmen ist, entstehen diese durch die gewählte Trapezform des Gehäuses und die Anordnung der hoch verdichteten Keramiken. Durch die so ermöglichte Reflexion der Infrarotstrahlen im Gerät kommt es zu Kollisionen der Strahlungen, wodurch wiederum Interferenzen auftreten und aus der gerichteten die verstärkte Kreuzwellen-Infrarotstrahlung generiert wird. Nach Aussage des Herstellers werden die Frontplatten durch die Strahlen erhitzt und schaffen durch die gleichmäßige Strahlungsverteilung ein homogenes Raumklima.

Weitere Kenndaten sind dem Datenblatt E.1 im Anhang E zu entnehmen.

3.2 Funktionsweise

Zusammen mit den Geräten selbst wurden ein drahtloses Raumthermostat und ein Funkschalter geliefert, um eine intelligente Steuerung der Stromspartaktung zu ermöglichen. Durch das Funk-Raumthermostat wird die Raumtemperatur eingestellt, die Temperaturregelung selbst wird von der intelligenten Steuerung des BioHeatPlus übernommen.

Um diese intelligente Steuerung so gut wie möglich nutzen zu können, ist – wie der Abbildung 3.1 zu entnehmen ist – die Installation der kostenlosen, von der eQ-3 AG entwickelten App „Homematic IP“ empfehlenswert. Um die Temperatur über das Smartphone beeinflussen zu können, wird zuerst der Access Point angeschlossen und über die App mit dem Smartphone verbunden. Über die Funktion „Geräte anlernen“ besteht dann die Möglichkeit, sämtliche Komponenten des Aufbaus

ebenfalls mit dem Smartphone zu verbinden, in diesem Fall zwei Schalt-Steckdosen und das Wandthermostat (siehe Abbildung D.1).

Zur optimalen Steuerung können außerdem unterschiedliche Heizprofile angelegt werden, in denen sich für jeden Tag bis zu sechs An- und Abstiegsflanken der Temperatur einstellen lassen. Neben diesem regulären Betrieb besteht über die Boost-Funktion die Möglichkeit einer kurzzeitigen Erwärmung des Raumes, etwa nach dem Lüften.

Neben der Möglichkeit, die Temperatur über ein kurzes Intervall nach oben zu regulieren, lässt sie sich auch für einen individuell einstellbaren Zeitraum absenken. Der sogenannte Eco-Betrieb dient der Energieeinsparung bei außerplanmäßigen Abwesenheiten wie beispielsweise während eines Urlaubs oder eines Einkaufs.

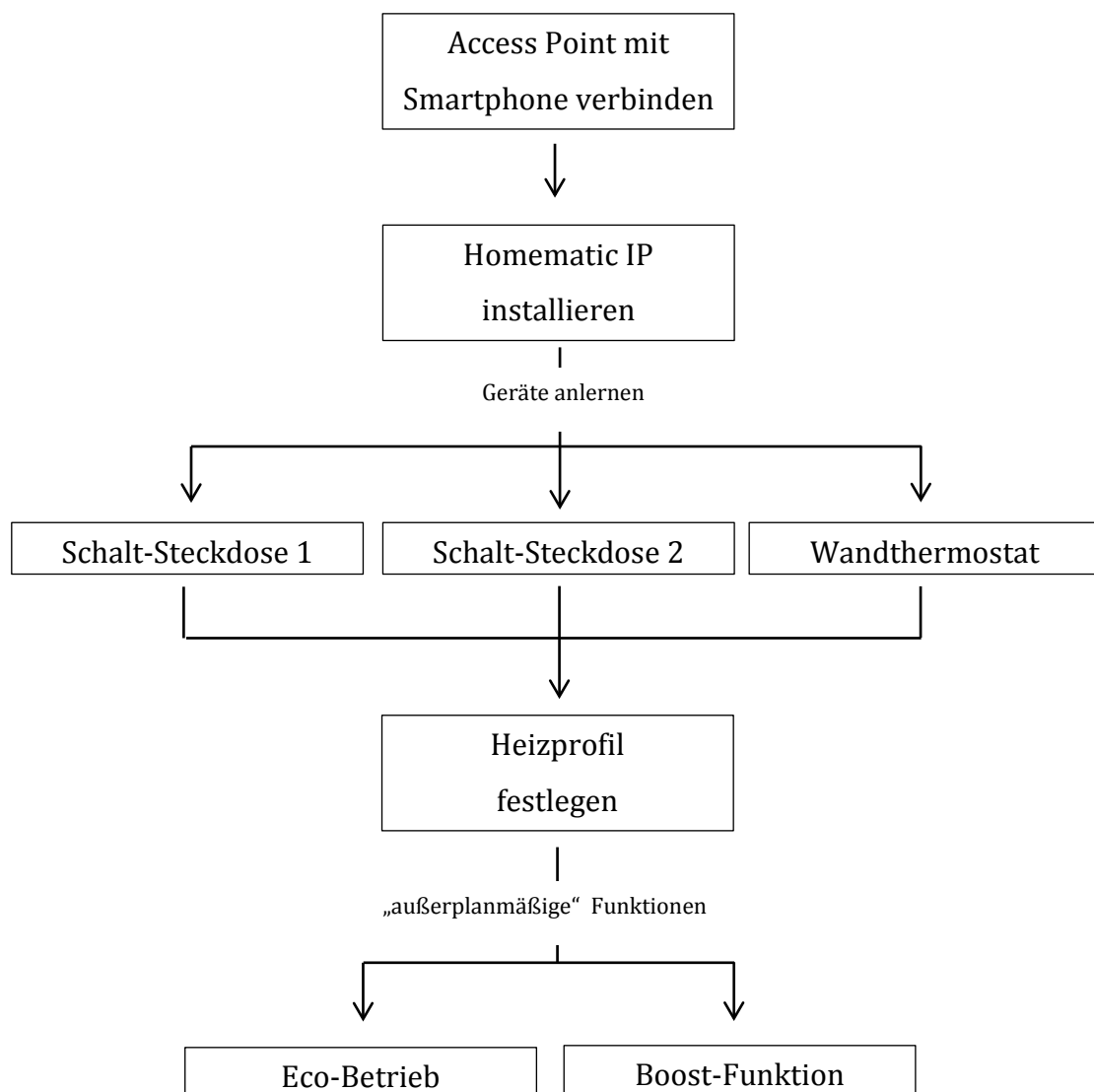


Abbildung 3.1: Funktionsskizze für die Nutzung der Funksteuerung

4 Messung und Auswertung

Um die Aussagen des Herstellers auf ihre Richtigkeit zu prüfen, wurden acht Messungen und drei Befragungsrunden durchgeführt. Zunächst wurde über einen Zeitraum von mehreren Tagen das Temperaturverhalten im Testraum betrachtet, wobei die Sensoren bei jeder Messung neu positioniert wurden. Nach Abschluss dieser Testphase galt es, das Verhalten der Heizstrahler auszuwerten. Hierfür wurde die Positionierung der Sensoren beibehalten, bei der die Messergebnisse am aussagekräftigsten hinsichtlich möglicher Temperaturunterschiede waren.

4.1 Messwerkzeuge

Als Grundlage für die Erfassung der benötigten Temperaturdaten diente ein Raspberry Pi in der Version 2.0. Dabei handelt es sich um einen sog. Einplatinencomputer (engl.: *single board computer*), in dem sowohl alle Hardwarekomponenten als auch diverse Ein- und Ausgänge auf *einer* Platine in kompakter Form verbaut sind. Durch diese Kompaktheit eignet sich der Raspberry Pi insbesondere für mobile Einsätze sowie für einen schnellen Auf- und Abbau der Messapparatur.

Die Implementierung des Raspberry Pi als Messsystem erfolgte am Lehrstuhl ie3 im Verlauf einer Bachelorarbeit mit dem Titel „Konzeptionierung und Aufbau einer Speicher- und Auswertungslogik für die Langzeitprotokollierung von Messdaten“ [31].

Tabelle 4.1: Sensor-IDs

Sensor	ID
4	406FE2020800
6	177CE1020800
7	9C4BE2020800
9	82C5E2020800

Für die Temperaturmessung kamen vier Sensoren des Typs DALLAS DS1820 zum Einsatz. Sie sind kompatibel mit dem 1-Wire-Protokoll, das eine Kommunikation mit den verwandten Sensoren ermöglicht. Dieses wurde von der Firma Dallas Semiconductor Corp. entwickelt und bietet den Vorteil der Datenübertragung und der

Stromversorgung über dieselbe Leitung. Die Sensoren erfassen Temperaturen von -55 °C bis 125 °C mit einer Genauigkeit von 0,5 °C in dem hier relevanten

Temperaturbereich von 10 °C bis 35 °C (siehe Abbildung E.3), wobei hier von der operativen und nicht der tatsächlichen Temperatur auszugehen ist. Da die Signalübertragung digital erfolgt, wird beim Konvertieren des Temperaturwertes in ein digitales Wort von einer Latenzzeit von 200 ms ausgegangen (siehe Abbildung E.1). Die zu den jeweiligen Sensoren gehörigen IDs sind Tabelle 4.1 zu entnehmen.

Das in Anhang E enthaltene Blockdiagramm (siehe Abbildung E.4) zeigt den genauen Aufbau eines einzelnen Sensors. Dabei ist u.a. das für das 1-Wire-Protokoll benötigte Interface mit 64-Bit ROM und der integrierte Kondensator für die Gewährleistung der Stromversorgung über die Datenleitung zu erkennen.

Zusätzlich kommt eine Wärmebildkamera des Modells FLUKE Ti25 zum Einsatz. Da jeder Körper, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt ($0\text{ K} \cong -273,15^\circ\text{C}$) liegt, Wärme im Infrarotbereich abstrahlt, wird diese Infrarotstrahlung von der Wärmebildkamera erfasst und mittels einer definierten Farbtemperaturskala sichtbar gemacht.

Um eine Übersicht der anfallenden Energiekosten zu erhalten, wird das Energiekostenmessgerät „Energy Logger 4000“ der Firma Voltkraft angeschlossen. Durch Anwählen der Anzeige „Power1“ werden die Werte für Strom, Spannung und Frequenz dargestellt, durch Anwählen von „Power2“ jene für Schein- und Wirkleistung, sowie der Leistungsfaktor. Nach Belieben kann außerdem der gesamte Energieverbrauch, der Energieverbrauch pro Tag und die daraus entstehenden Kosten, die Betriebszeit pro Tag als auch eine Kostenvorschau angezeigt werden.

4.2 Testumgebung

Als Testraum für die Messungen wird der Büroraum BCI-G2-E10 mit den Maßen 300 cm x 270 cm x 550 cm (Höhe x Breite x Länge) gewählt, der in der Regel nicht rund um die Uhr besetzt ist. Mit seinen drei Arbeitsplätzen, die sich direkt an der Längswand und unter einem der beiden Fenster befinden (siehe Abbildung 4.1) dient er Studierenden zum Arbeiten. An der kürzeren Wand des Raums befindet sich direkt unter dem Fenster ein Heizkörper, der zum Zeitpunkt des Beginns von Messung 1 auf Stufe 3, d.h. 20 °C eingestellt war.

Die Wahl dieses Büros als Testumgebung ergab sich vor allem aus den unterschiedlichen Umgebungsbedingungen des Raumes: Während er von zwei Wänden nach außen hin abgegrenzt wird, dient die andere kürzere Seite als Grenze zum Flur. Die andere längere Seite dagegen trennt den Testraum vom ebenfalls als Büro genutzten Nebenraum. Um von einem in den anderen Raum zu gelangen, wurde eine Tür hinter dem Arbeitsplatz 1 eingelassen, die durchgängig geöffnet ist.

Für den Versuchsaufbau ist die nicht durchgängige Nutzung des Raumes von Vorteil, da sich damit eine mögliche Änderung der Temperatur begründen ließe (z.B. aufgrund zusätzlicher Wärme durch Computerbetrieb, da Computer bei Belastung warme Luft durch den Lüfter abgeben). Um anwesende Personen erfassen zu können, wird eine Liste aufgehängt mit der Bitte, sich darin mit Datum und Uhrzeit der Anwesenheit einzutragen (siehe Abbildung D.5).

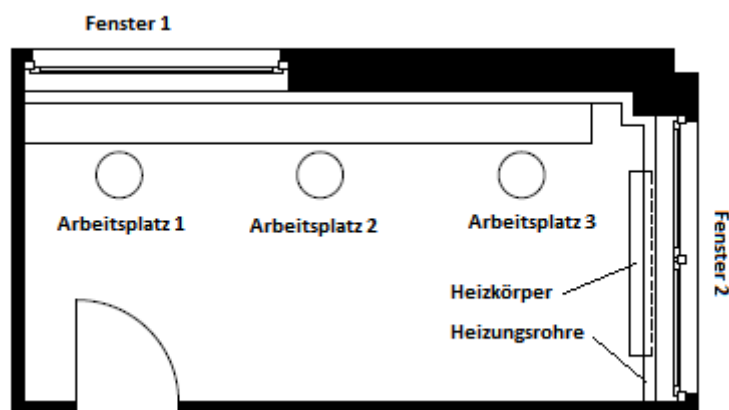


Abbildung 4.1: Grundriss der Testumgebung

4.3 Nebenbedingungen

Vor Beginn der tatsächlichen Durchführung der Messungen müssen die Nebenbedingungen erfasst werden, die für die Auswertung aller Ergebnisse von essentieller Bedeutung sind:

- Die Messungen finden in den Frühlingsmonaten statt. Charakteristisch für diese Periode ist das wechselhafte Wetter: Die Sonnenstunden wie auch die

Höchsttemperaturen weisen im Vergleich über mehrere Tage starke Schwankungen auf.

- An der Wand unter den Tischen der Arbeitsplätze verlaufen zwei Heizungsrohre.
- Unter den Tischen herrscht eine gewisse Temperaturträgheit: Bei einer Änderung der Temperatur erfassen die Sensoren über den Tischen diese neue Temperatur schneller als der Sensor unter dem Tisch des Arbeitsplatzes 2.
- Mittels vollautomatischer Regelung erfolgt eine Nachtabsenkung der Temperatur auf 17 °C. Ab etwa 6:00 Uhr morgens wird diese schrittweise wieder auf 21 °C angehoben.
- Eine Beobachtung des Raums rund um die Uhr ist rechtlich nicht zulässig. Bestimmte Randbedingungen können daher nicht erfasst werden. Dazu zählen:
 - Wie viele Personen waren tatsächlich anwesend, die sich nicht eingetragen haben?
 - Wann wurde wie lange gelüftet?
 - Wie oft wurde die Tür geöffnet?

4.4 Messungen bei Nutzung der Konvektionsheizung

Zunächst wird die Raumtemperatur an vier verschiedenen Punkten der Testumgebung während der Nutzung einer gängigen Konvektionsheizung erfasst. Dies dient der Feststellung effektiver Positionen für die Sensoren, um Ergebnisse mit einer möglichst hohen Aussagekraft zu erzielen. In der Theorie sammelt sich die kalte Luft im Fußbodenbereich, während sich die warme Luft wegen der in Kapitel 2 bereits erwähnten Zirkulation unter der Decke sammelt. Aufgrund dessen besteht die erste wichtige Anforderung an den Testaufbau in der unterschiedlichen Höhe der Sensorpositionen, um unterschiedliche Ebenen erfassen zu können. Da es nach Herstellerangaben jedoch heißt, dass eine solche Aufteilung des Raumes in eine wärmere und eine kältere Hälfte nicht mehr gegeben ist, soll bei der späteren Auswertung besonders auf die Temperaturdifferenzen zwischen den unterschiedlichen Sensoren geachtet werden, die folglich bei Messungen während des Strahlerbetriebs geringer als beim Konvektionsheizungsbetrieb sein sollten.

4.4.1 Messung 1: Temperaturerfassung am Wochenende

Für die erste Messung vom Freitag, dem 01. April 2016 bis zum Montag, dem 04. April 2016, wurden die in der Abbildung 4.2 gekennzeichneten Positionen für die Sensoren gewählt.

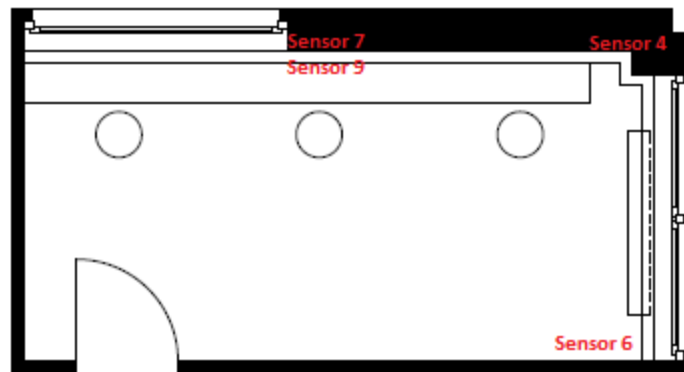


Abbildung 4.2: Sensorpositionierung für die Messung 1

Wie aus Abbildung 4.2 hervorgeht, befinden sich die Sensoren 4 und 6 jeweils in einer Ecke in der Nähe von Fenster 2 und mit 2,5 m in Deckennähe, Sensor 7 an Fenster 1 in 2,5 m Höhe. Ausgewählt wurden diese Positionen nach [32], wo unter anderem Fenster und Raumecken als typische Orte für Wärmebrücken benannt werden. Sensor 9 befindet sich dagegen mit 0,1 m Höhe im Fußbodenbereich und damit knapp über den Heizungsrohren. Wie bereits im Kapitel „Konvektion“ erläutert bilden sich durch die Luftzirkulation im unteren Halbraumbereich die kälteren und im oberen Halbraumbereich die wärmeren Gebiete aus. Bei einzelnen Personen könnte dies, insbesondere bei Temperaturempfindlichkeit, zu thermischer Unbehaglichkeit im Fußbodenbereich führen.

Allgemein stellen Ecken und die Umgebung um die Fenster herum wichtige zu untersuchende Positionen dar, da sich die postulierte bessere Wärmeverteilung vor allem in den Ecken zeigen sollte. Bezüglich der Fensterumgebung kann aufgrund von merklichen Undichtigkeiten des Raumes zwar Nachsicht geübt werden, aber da Wärmebrücken im Fensterbereich keine Seltenheit sind, wird diese Umgebung dennoch in die Betrachtung einbezogen. Mithilfe der Positionierung der Sensoren soll daher ermittelt werden, ob sich in diesem Bereich tatsächlich eine Änderung der

Temperaturen zum Positiven hin zeigt, d.h. dass sich, wie vom Hersteller versprochen, die Wärmebrücken vermindern.

Ergebnisse

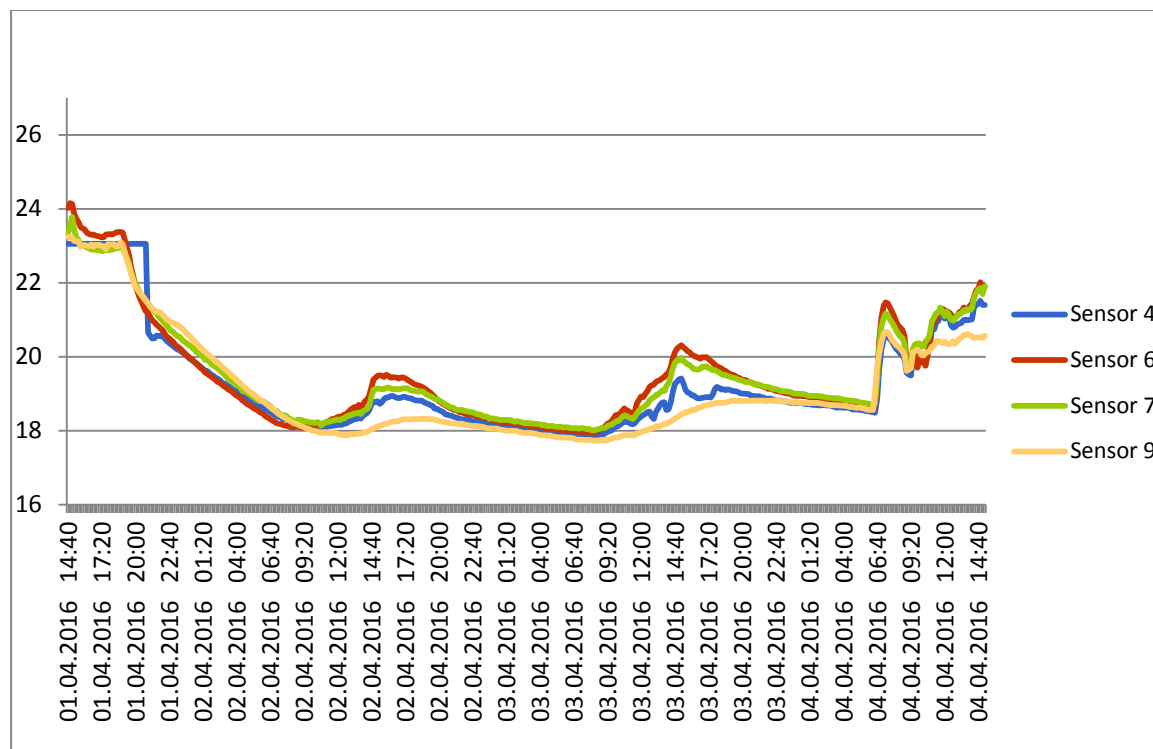


Abbildung 4.3: Innentemperaturen Messung 1

Es fällt auf, dass die Sensoren 6 und 7 weitestgehend ähnliche bis gleiche Temperaturen verzeichnen. Eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass das einfallende Sonnenlicht auf beide Sensoren strahlt, während der Sensor 4 kaum von diesem getroffen wird und somit auch eine niedrigere Temperatur anzeigt.

Auch der Sensor 9 im Fußbodenbereich weist hinsichtlich der Temperaturwerte einen im Vergleich zu den Sensoren 6 und 7 niedrigeren Bereich auf. Dies ist aufgrund der Eigenschaften der Konvektion zu erwarten: Die kältere Luft befindet sich im unteren Halbraum des Büros.

Das Verhalten des Sensors 4 zu Beginn der Messung zeigt einen sehr glatten Verlauf, der für die Realität zu starke ideale Züge aufweist: Da sein Temperaturverlauf stets dem der Sensoren 6 und 7 ähnlich ist, sollte dies ebenfalls zu Beginn der Messung der Fall sein. Da stattdessen allerdings eine ideal konstante Linie um 23,05 °C sowie

ein plötzlicher, nahezu senkrechter Abfall bis hin zur 20,5 °C-Marke gemessen wurden, ist von Messfehlern auszugehen, die vermutlich von einem Wackelkontakt am vorliegenden Sensor herrühren.

Bei Betrachtung aller vier Sensoren im Zusammenhang lassen sich schnell Tendenzen erkennen. Zunächst zeigt sich durch den stetigen Abfall aller vier Temperaturen am 01. April ab etwa 18:30 Uhr eine Temperaturabsenkung bis auf knapp 18 °C. Im Nachmittagsbereich, d.h. von etwa 15:00 Uhr bis 19:00 Uhr des zweiten Messtages bildet sich der erste Peak heraus, der mit der Tageshöchsttemperatur sowie der Sonnenstunden zu erklären ist: Bei einer an der Wetterstation Dortmund-Wickede gemessenen Höchsttemperatur von 14 °C zeigen sich etwa sechs intensive Sonnenstunden [33].

Ähnlich verhalten sich die Messwerte am Tag darauf, dem 03. April. Hier kommt es allerdings schon gegen 14:00 Uhr zu einem nennenswerten Anstieg der Temperaturen bis hin zu vom Sensor 6 gemessenen Höchstwert von 20,31 °C um 15 Uhr. Auch hier liefert die Höchsttemperatur in Verbindung mit den Sonnenstunden aufgrund der in den Raum einfallenden Wärmestrahlung die Erklärung für ein derart spitzes Maximum: Die Höchsttemperatur lag bei 19 °C; die knapp vier Sonnenstunden fallen beinahe gänzlich in den frühen Nachmittagsbereich [33].

Beim Vergleich des Raumklimas ist der Unterschied zwischen sonnigen und weniger sonnigen Tagen deutlich spürbar. Da Fenster 1 nach Westen hin ausgerichtet ist, können schon im frühen Nachmittagsbereich Sonnenstrahlen über einen spitzen Winkel in den Raum einfallen und diesen merklich erhitzen.

Der steile Anstieg am Montag, dem 04. April, ab etwa 6:30 Uhr morgens wird durch Herrn Richard, dem Verantwortlichen für die Regelung der Heizungen an der TU Dortmund, bestätigt: Durch die vollautomatische Regelung wird die Temperatur bis auf 21 °C angehoben, die durchschnittlich zu dem Zeitpunkt der Messung auch erreicht werden.

4.4.2 Messung 2: Temperaturerfassung unter der Woche

Die zweite Messung erfolgte vom Montag, dem 04. April 2016 bis zum Freitag, dem 08. April 2016.

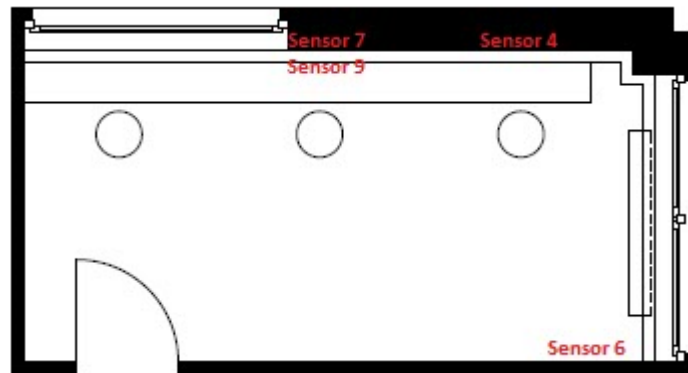


Abbildung 4.4: Sensorpositionierung für die Messung 2

Da die erste Messung nahezu identische Werte für den 6. und 7. Sensor ergab, wurde die Position von Sensor 6 vertikal um etwa 0,5 m in Richtung Boden verändert. Außerdem erhielt Sensor 4 eine neue Position: Zur Bestimmung der Temperatur im Kopf- und Schulterbereich bei sitzender Tätigkeit wurde dieser Sensor an der Wand auf Augenhöhe (1,1 m) einer theoretisch am Arbeitsplatz 3 sitzenden Person angebracht.

Ergebnisse

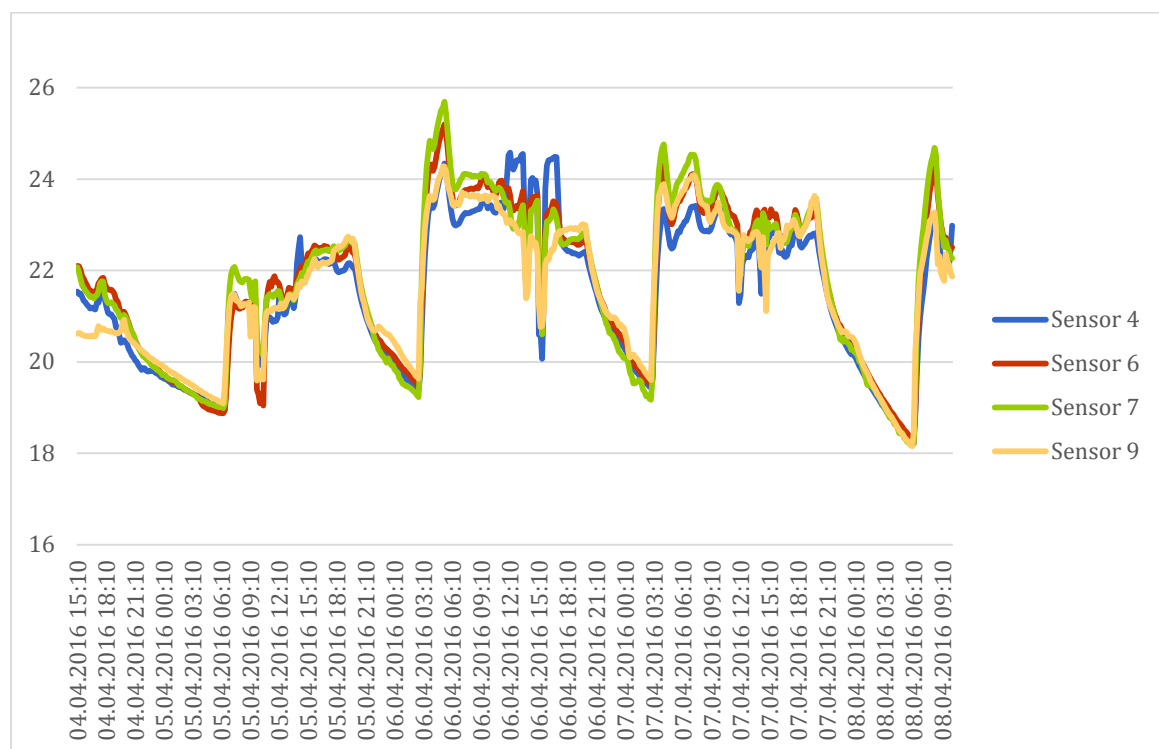


Abbildung 4.5: Innentemperaturen Messung 2

Schon auf den ersten Blick fällt bei der Auswertung der zweiten Messung auf, dass die Temperaturverläufe dem typischen Verlauf bei der Öffnung eines Ventils in Gebäuden der TU Dortmund stark ähneln. Die auf Nachfrage von der Leitwarte erhaltenen Kurvenverläufe (siehe Abbildung D.6) zeigen deutlich die Abhängigkeit der Ventilöffnung zur Außentemperatur. Besonders gut zu erkennen sind die steilen Flanken im frühen Morgenbereich, der Zeitpunkt, an dem die Temperatur wieder auf 21 °C angehoben wird, sowie die Einbrüche im Nachmittagsbereich, wenn die Temperatur ihre Höchstwerte erreicht.

Im Vergleich zur Messung 1 fällt außerdem der veränderte Verlauf bei den Werten des Sensors 4 auf. Die kurzzeitigen Anstiege stimmen mit den Zeiten überein, an denen sich Personen am Rechner aufhielten, deren Gebläse somit eine zusätzliche Wärmebildung ermöglichten.

Da anhand der Ergebnisse sehr deutlich die Auswirkungen der Temperatur in Verbindung mit der Sonneneinstrahlung in einem gegebenem Raum zu erkennen sind, sollten nun im weiteren Verlauf durch Verschiebung von Sensor 6 u.a. die Temperaturen im Innenbereich des Raumes erfasst werden.

4.4.3 Messung 3: Temperaturerfassung am Wochenende

Die dritte Messung zeichnete die Daten vom Freitag, dem 08. April 2016 bis einschließlich Montag, dem 11. April 2016 auf. Die dazu gewählten Positionen der Sensoren sind aus Abbildung 4.6 zu ersehen.

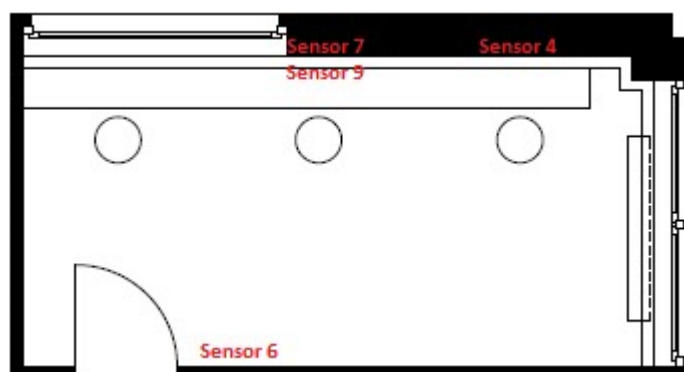


Abbildung 4.6: Sensorpositionierung für die Messung 3

Die Sensoren 4, 7 und 9 blieben unverändert an ihren Positionen, Sensor 6 erhielt dagegen mit seiner Platzierung neben der Verbindungstür der beiden Räume eine neue Messumgebung. Da sich die Eingangstür zu den Büroräumen im Raum E11 befindet, der durchquert werden muss, um in den Testraum E10 zu gelangen, würde sich durch das Öffnen der Eingangstür hier eventuell auftretende Zugluft zuerst bemerkbar machen. Außerdem galt es, durch die Messung Klarheit darüber zu gewinnen, ob es durch die permanent geöffnete Verbindungstür zu einem größeren Wärmeverlust im Raum E10 kommen würde.

Ergebnisse



Abbildung 4.7: Innentemperaturen Messung 3

Wie der Abbildung 4.7 zu entnehmen ist, macht die Anordnung der Sensoren insbesondere im nahezu unbeheizten Zustand des Raumes, wie es am Wochenende stets der Fall ist, den Temperaturunterschied aufgrund der konvektiven Eigenschaften des Heizsystems deutlich: Die Kurve von Sensor 9 verläuft am Samstag und Sonntag merklich flacher als die Temperaturkurven der anderen drei Sensoren. Die höchsten Messwerte lassen sich insbesondere am Wochenende klar dem Zeitbereich zwischen 15:00 Uhr und 16:00 Uhr einzuordnen, wobei nach

Wetterdatenaufzeichnungen auch die Tageshöchsttemperatur am Sonntag mit 16 °C höher war als am Samstag mit 14 °C [33].

Die Wahl der Positionierung von Sensor 6 neben der Tür, und damit gegenüber vom Fenster 1, hat sich bewährt, da insbesondere am Montag, dem 11. April 2016, gegen 15:00 Uhr ein markanter Temperaturanstieg gemessen wurde, der bei diesem Sensor noch stärker ausgeprägt ist als bei den anderen. Da die Sonne durch das (recht große) Fenster 1 dem Raum problemlos Licht und somit auch Wärme spenden kann, ist der gemessene Wert von 23,03 °C bei einer Anzahl von knapp 13 Sonnenstunden nicht verwunderlich.

4.5 Messungen bei Nutzung der IR-Strahler

Für eine geeignete Positionierung der Heizstrahler wurde die Firma BioHeatPlus kontaktiert. Die Mitarbeiter erhielten drei Aufnahmen des Raums (siehe Abbildungen D.2 bis D.4) und wurden um ihre Meinung zu der effizientesten Position der beiden Geräte gebeten. Dabei stellte sich heraus, dass es im Prinzip zwei Möglichkeiten gibt, die zwei Heizstrahler kombinatorisch möglichst effizient im Raum anzubringen. Im Falle des ersten Strahlers waren sich die Mitarbeiter einig, dass dieser an Position 1 (siehe Abbildung 4.8) angebracht werden sollte. Der zweite Strahler sollte entweder in der Lücke zwischen Schreibtisch und Fenster (Position 2) oder an der gegenüberliegenden Wand (Position 3) platziert werden. Bei der Umsetzung fiel die Wahl auf die Positionen 1 und 3, wo die Strahler in einer Höhe von 2,30 m angebracht wurden. Grund für den Ausschluss der Position 2 als möglichen Anbringungsort war zum einen ein Platzmangel an der gewünschten Stelle, zum anderen die Überlegung, dass der Heizstrahler von einer solchen Position aus möglichst positiv auf die thermische Behaglichkeit der im Raum anwesenden Personen wirken sollte. Denn selbst wenn sich die Strahlungswärme (theoretisch) nach einiger Zeit verteilen würde, gäbe es immer noch einen gewissen Anteil an punktueller Strahlungswärme. Da dies je nach Temperatureinstellung und der daraus resultierenden Strahlungswärme in einer derart unmittelbaren Nähe als unangenehm empfunden werden könnte und vor allem die Person am Arbeitsplatz 3 davon betroffen wäre, wurde auf diese Position verzichtet.

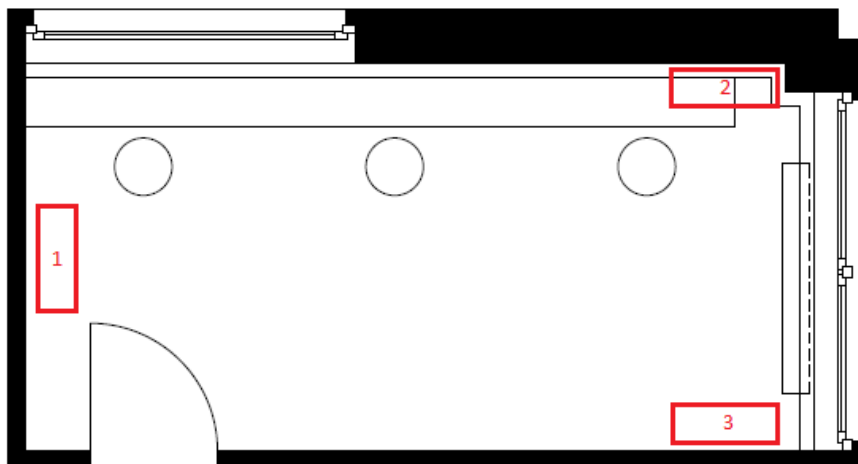


Abbildung 4.8: Positionierung der Heizstrahler

Aufgrund der Tatsache, dass sich vor allem aus den Ergebnisse der dritten Messung am ehesten aussagekräftige Schlüsse ziehen ließen, wurde die dort verwendete Positionierung der Sensoren auch für den weiteren Versuchsverlauf genutzt. Vor Beginn der vierten Messung wurden die Strahler auf einer Temperatur von 17 °C am Wochenende und 20 °C in der Woche betrieben (Heizprofil 1). Bereits eine Stunde nach Inbetriebnahme der Strahler meldete ein Studierender Geruchsbildung. Dieser Effekt, obwohl grundsätzlich unerwünscht, wäre noch hinnehmbar, wenn er nur kurz nach der ersten Inbetriebnahme auftreten würde, da dann davon auszugehen wäre, dass der Geruch lediglich aufgrund abgesetzten Staubes entsteht und somit nach einer gewissen Zeit verfliegt.

4.5.1 Messung 4: Temperaturerfassung

Für die vierte Messung wurde mithilfe der App ein Heizprofil erstellt. Aus den Anwesenheitszeiten der Studierenden in dem Raum wurde abgeleitet, wann mit dem Beheizen des Raums begonnen werden sollte. Dabei war zu beachten, dass Infrarotheizungen länger benötigen als konventionelle Heizungen, die gewünschte Temperatur in einem Raum zu erreichen. Da das Büro in der Vergangenheit zumeist erst gegen 9:00 Uhr morgens besetzt war, wurde während der Woche von 6:00 Uhr an ein Temperaturanstieg auf 20 °C, ein nach ASR A3.5 gesetzlich vorgeschriebener Wert bei leichter Arbeitsschwere im Sitzen, voreingestellt. Dieser Wert sollte bis 18:00 Uhr gehalten werden, bevor es dann zu einer Temperaturabsenkung auf 17 °C kommen sollte. Für den Samstag und den Sonntag wurde dagegen auf eine

Temperaturerhöhung verzichtet, so dass es für diese Tage bei einer Basistemperatur von 17 °C blieb.

Ergebnisse

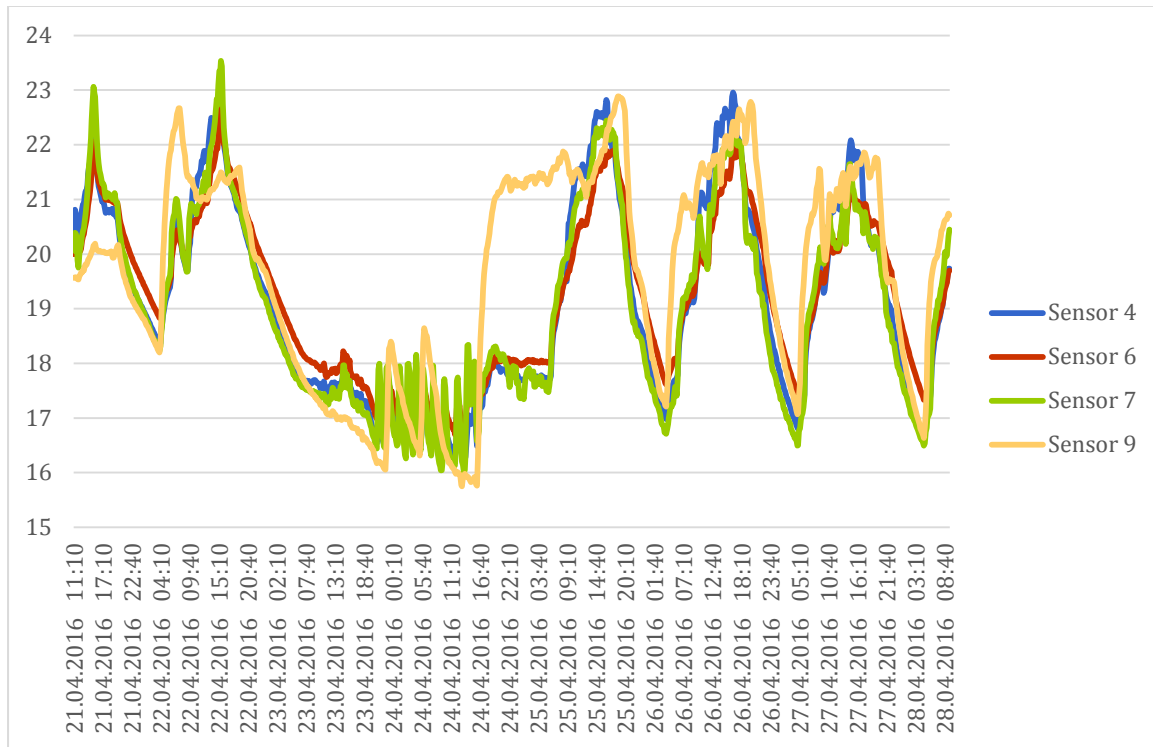


Abbildung 4.9: Innentemperaturen Messung 4.1

Bei den letzten Messungen fällt vor allem auf, dass sich die Werte des Sensors 9 am Wochenende hinsichtlich der Temperaturaufzeichnung stark von den anderen Sensoren unterscheiden. Die Ergebnisse der vierten Messung (Messung 4.1) vom 21. April 2016 bis 28. April 2016 zeigen insbesondere am Wochenende einen stark sägezahnmäßigen Temperaturverlauf, der sich m.E. bei den Sensoren 7 und 9 jedoch zu stark herausbildet. Um sicherzugehen, dass es sich hier nicht um einen möglichen Wackelkontakt oder ähnlichen Messfehler handelt, wurde am Wochenende vom 30. April bis 01. Mai eine nochmalige Messung (Messung 4.2) durchgeführt (siehe Abbildung 4.10).

Die Ergebnisse vom ersten Tag der Messung 4.1 sind wie erwartet: Für den 21. April wird der Funkschaltung eine bis 18 Uhr zu haltende Temperatur von mindestens 20 °C vorgegeben. Während sich an den Sensoren 4, 6 und 7 Maxima herausbilden, die die 20 °C-Marke deutlich übersteigen, hält Sensor 9, der als einziger von der

Sonnenstrahlung nicht erreicht wird, bis 20:30 Uhr vergleichsweise konstant die Temperatur von 20 °C, bis diese anfängt abzusinken.

Am Freitag, dem 22. April bildet sich bei allen vier Sensoren nahezu zeitgleich um etwa 7:00 Uhr jeweils ein Temperaturmaximum. Der ähnliche Verlauf lässt darauf schließen, dass der Anstieg und Abfall der Temperaturen auf das zwischenzeitliche Temperaturhoch verursacht durch eine sehr intensiv strahlende Sonne zurückzuführen ist. Die Tatsache, dass der Verlauf der Temperaturkurve des 9. Sensors insgesamt ausgeprägter und das Maximum 1,5 °C über denen der anderen drei Sensoren liegt, ist mit der Ausrichtung des Strahlers an Position 3 zu erklären: Dieser beginnt um 6:00 Uhr den Raum zu erwärmen und strahlt durch seine Winkelausrichtung direkt auf den Sensor 9, der somit durch eben diese punktuelle Strahlung ein Plus an Wärme gegenüber dem Rest der Umgebung verzeichnet. Die Peaks mit einem Maximalwert von knapp 23,5 °C an Sensor 7 gegen 15:30 Uhr zeigen die Auswirkungen von Außentemperatur und Sonneneinstrahlung auf den Raum. Bis auf Sensor 9 verzeichnen alle anderen Sensoren einen vergleichbaren Verlauf mit markanten Maxima. Dies lässt sich u.a. darauf zurückführen, dass es sich im Zeitraum vom 18. bis 22. April um fast schon sommerliche Tage mit Temperaturen zwischen 14 °C und 17 °C und einer Höchstsonnenstundenanzahl von 13 Stunden handelte.

Die Temperaturverläufe an den vier Tagen vom 25. bis einschließlich 28. April sind ebenfalls sehr ähnlich; auch hier ist der Effekt des Sensors 9 zu sehen. Vor allem aber machen diese Verläufe zweierlei deutlich:

1. Nicht nur zeigt sich das frühzeitige Ansteigen der Temperatur an Sensor 9 aufgrund der direkt auf ihn einwirkenden Strahlungswärme, sondern auch die trotz allem noch vorhandene Temperaturträgheit unter den Tischen: Die Temperatur dort fällt zuletzt unter die 20 °C-Grenze.
2. Sobald die Temperaturen die 20°C-Marke erreicht haben, werden sie bis zum Zeitpunkt des Wirkens der Nachtabenkung gehalten. Der Regelungseffekt ist besonders am 26. April um 11:40 Uhr nachweisbar: Hier fallen die Temperaturen an den Sensoren 6 und 7 kurzzeitig knapp unter 20 °C, wodurch sich die Heizstrahler aktivieren und die Raumtemperatur wieder

steigt. Auch bei den anderen Sensoren ist ein leichter Temperaturzusammenbruch zu sehen, was mit hoher Wahrscheinlichkeit auf ein Stoßlüften zurückzuführen ist.

Bei der Auswertung der zusätzlichen Messung (Messung 4.2) ergibt sich in der Nacht vom 30. April auf den 01. Mai ein sehr sägezahnförmiger Verlauf der Messergebnisse. Insbesondere die Sensoren 4, 6 und 7 unterstützen die oben bereits getroffene Feststellung bzgl. der Regelung, da die Peaks stets nach dem Unterschreiten der Basistemperatur von 17 °C auftreten.

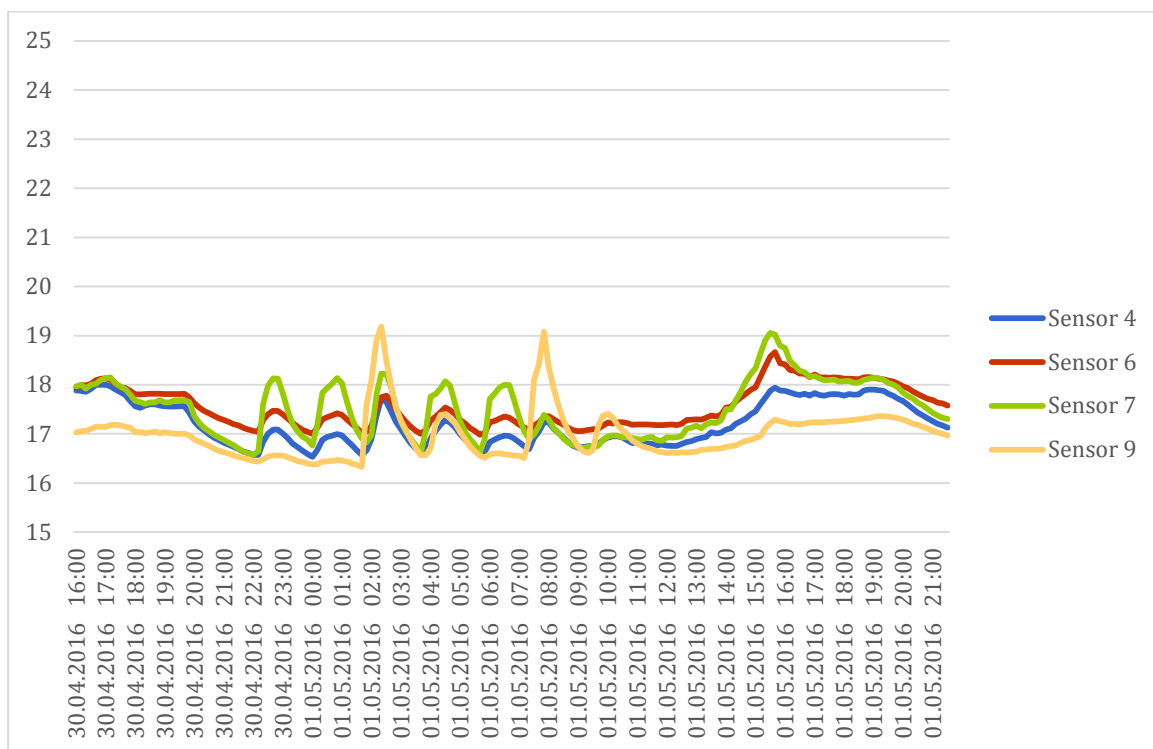


Abbildung 4.10: Innentemperaturen Messung 4.2

Insgesamt ist beim Vergleich der Temperaturverläufe zwischen den Wochentagen und Wochenenden zu unterscheiden. Zunächst sind zum einen die Anstiege an den Tagesanfängen sowie der Abfall zu den Tagesenden hin innerhalb der Woche bei Nutzung der Konvektionsheizung glatter, zum anderen verhält sich die Temperatur an allen Sensoren nahezu identisch, so dass die Graphen zu den Zeitintervallen überlappen. Im Gegensatz dazu liegen diese bei der Messung 4.1 zu den genannten Zeiten im Hinblick auf die Werte mit jeweils etwa 0,25 °C übereinander. Auch im Nachmittagsbereich ähneln sich bei den Messungen 1 bis 3 die Temperaturverläufe

an den einzelnen Sensoren, so dass sich stets ein Trend erkennen lässt. Dafür sind allerdings insbesondere bei Messung 2 vergleichsweise starke Temperatureinbrüche zu Zeitpunkten des Lüftens zu erkennen, die bei der Messung 4.1 infolge des Anspringens der Heizstrahler nicht gegeben sind.

An den Wochenenden lassen sich bis auf den noch immer stark sägezahnförmigen Verlauf der Messwerte über Nacht keine markanten Unterschiede feststellen. Dennoch fallen zwei Dinge auf: Zum einen zeigen sich bei der Messung 3 sowie auch bei der zusätzlichen Wochenendmessung außen temperaturabhängige Peaks im Nachmittagsbereich. Ein Unterschied macht sich allerdings bei der Einzelbetrachtung des Verhaltens der einzelnen Temperaturkurven bemerkbar. Während bei der Messung 3 am Wochenende stets an Sensor 6 die höchste Temperatur gemessen wurde, überkreuzen sich die Kurven der Messung 4.2 an mehreren Punkten, so dass am 01. Mai die höchste Temperatur am Sensor 7 gemessen wurde.

Unter Berücksichtigung der thermischen Behaglichkeit lässt sich ein wichtiger Unterschied zwischen den Ergebnissen beider Messungen feststellen. Die Temperaturdifferenz, die laut DIN 1946 zwischen Kopf- und Fußbodenhöhe nicht mehr als 2 K bzw. hier 2 °C betragen darf, erreicht bei der Messung 3 am 09. April um 15:00 Uhr einen Höchstwert von 1,31 °C, bei der Wochenendmessung am 01. Mai um 15:30 Uhr bei Nutzung der IR-Strahler dagegen maximal 0,66 °C.

Auch die Differenz der beiden gegenüberliegenden Halbräume liegt mit maximal 1,84 °C bei der Messung 4.2 und 1,75 °C bei der Messung 3 im vorgeschriebenen Bereich von 5 K bzw. 5 °C, zumal sich die beiden errechneten Differenzen nicht wesentlich voneinander unterscheiden.

4.5.2 Messung 5: Leistungserfassung

Um einen Überblick darüber zu gewinnen, wie oft die Heizstrahler im Laufe des Tages aktiviert werden, wird nun der Leistungsverbrauch unter erschwerten Bedingungen ermittelt. Während also mit der vierten Messung das Hauptaugenmerk auf die Wärmeverteilung innerhalb des Raumes gelegt wurde, soll nun auf die maximale und die durchschnittliche Leistung eines einzelnen Gerätes eingegangen

werden. Zu diesem Zweck wurde an einem Samstag von 11:30 bis 14:30 Uhr bei geöffnetem Fenster und einer Außentemperatur um 14 °C bis 16 °C mit dem Energiekostenmessgerät Energy Logger 4000 in Verbindung mit der zugehörigen Software auf der einen Seite die maximal erforderliche und auf der anderen Seite die durchschnittliche Leistung eines einzelnen Heizstrahlers gemessen, mit der sich die Raumtemperatur auf die gewünschten 30 °C erhöhen lässt, die als maximale Temperatur am Gerät an Position 3 eingestellt wird.

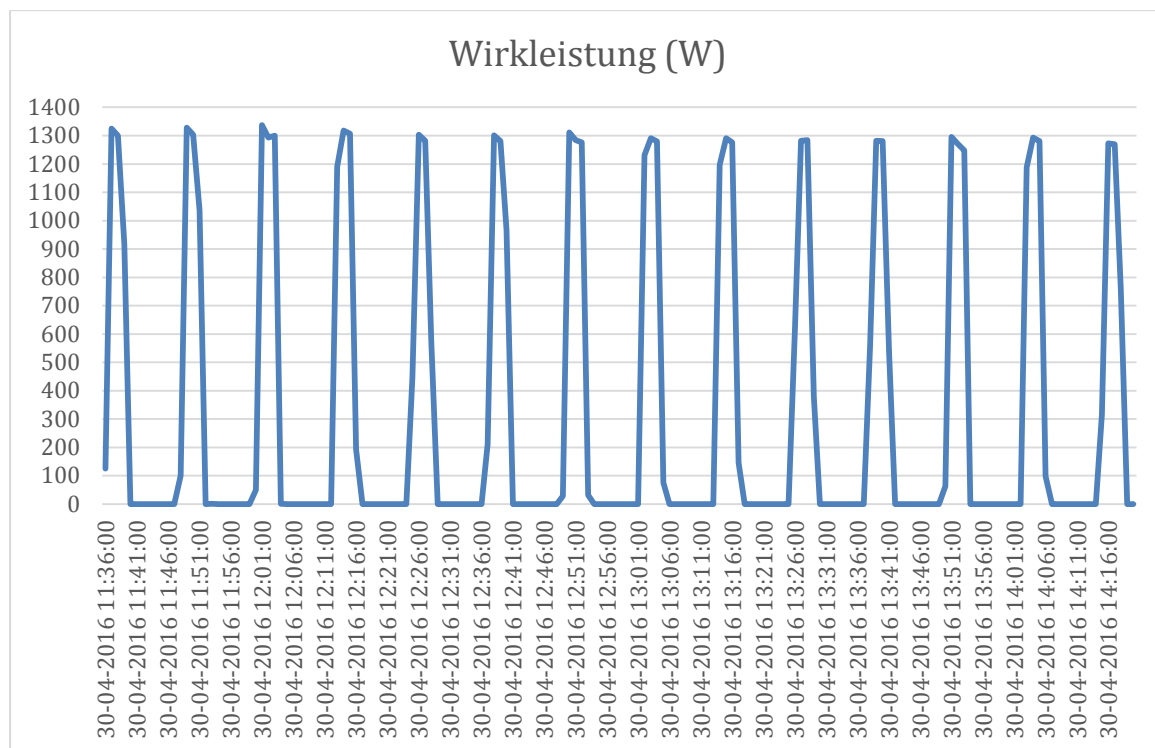


Abbildung 4.11: gemessene Wirkleistung Messung 5

Wie Abbildung 4.11 zeigt, ergibt sich ein einheitlich sägezahnförmiger Verlauf der Wirkleistung. Durchschnittlich verbraucht ein einzelnes Gerät unter erschwerten Bedingungen durchschnittlich 321,83 W, während der maximale Wert bei 1.336,81 W liegt.

4.5.3 Messung 6: Temperaturabsenkung

Um bestimmen zu können, wie effektiv sich die Wände und Objekte in Verbindung mit der Strahlungsheizungen als Wärmespeicher erweisen, wurde mit der sechsten Messung darauf geachtet, wie lange die Temperatur bei Abschalten der Geräte gehalten werden kann. Die Randbedingungen wie Personenanwesenheit und

Sonneneinfall sollten möglichst vereinfacht betrachtet werden, so dass die Messung unter folgenden Bedingungen durchgeführt wurde:

- Der Startzeitpunkt der Messung 6 war Freitag, der 29. April, um 18:40 Uhr.
- Die Ausgangstemperatur betrug 21,1 °C.
- Die Außentemperatur lag anfänglich bei 10 °C sank bis auf 7 °C um 20:00 Uhr ab.
- Die einzige anwesende Person verließ den Raum um 19:30 Uhr.
- Die Fenster waren während des gesamten Messzeitraums geschlossen.
- Die Tür zum Nebenraum blieb bis auf den Zeitpunkt des Verlassens der anwesenden Person um 19:30 Uhr ebenfalls geschlossen.
- Die Heizkörper der Konvektionsheizung wurden gänzlich abgestellt.
- Die Heizstrahler wurden vom Netz genommen.

Durch ständiges Beobachten des Thermostats zeigte sich rasch, dass die Temperatur bereits innerhalb der ersten 20 Minuten zu sinken begann, so dass das Thermostat gegen 19:00 Uhr einen Wert von 20,9 °C anzeigte. Die Werte verringerten sich im 10-15-Minuten-Takt um etwa 0,1 °C, bis um 20:40 Uhr – zwei Stunden nach Beginn der Messung – nur noch 20,2 °C angezeigt wurden.

Die Messung wurde beendet, sobald das Thermostat 20,1 °C anzeigte. Dieser Temperaturabfall von 1 °C wurde 2:23 h nach Beginn der Messung erreicht, also um 21:03 Uhr.

Das relativ langsame und sehr gleichmäßig verlaufende Abfallen der Temperaturwerte ist allerdings auch bei der Messung 3 unter konvektivem Betrieb gut zu erkennen: Wird dabei am Sensor 9 von einer Ausgangstemperatur von 21,1 °C um 20:30 Uhr am Freitag, dem 08. April ausgegangen, wird nach drei Stunden ein ähnlicher Temperaturunterschied von etwa 1 °C erreicht, so dass der Sensor um 23:30 Uhr einen Wert von 20,2 °C verzeichnet.

4.5.4 Messung 7: Wärmebildmessung

Um eine Aussage über die vom Hersteller propagierten Vorteile hinsichtlich des Punkts „Trockene Wände“ treffen zu können, werden die Wärmebilder der FLUKE

Ti25 bei Nutzung der konventionellen Heizung mit denen bei Nutzung der Heizstrahler verglichen.

Bei der Auswertung der Wärmebilder, die während der ausschließlichen Nutzung der Zentralheizung aufgezeichnet wurden, sind – wie Abbildung 4.12 zeigt – deutlich die Wärmebrücken an den Fenstern zu erkennen. Nach zwei Wochen des Betriebs der Heizstrahler haben sich diese signifikant vermindert. Dabei ist allerdings zu erwähnen, dass die Wärmebilder während der Nutzung der IR-Strahler zwar in den frühen Morgenstunden aufgenommen wurden, im Allgemeinen jedoch mildere Temperaturen herrschten als in der Periode, in der die konventionelle Heizung betrieben wurde.

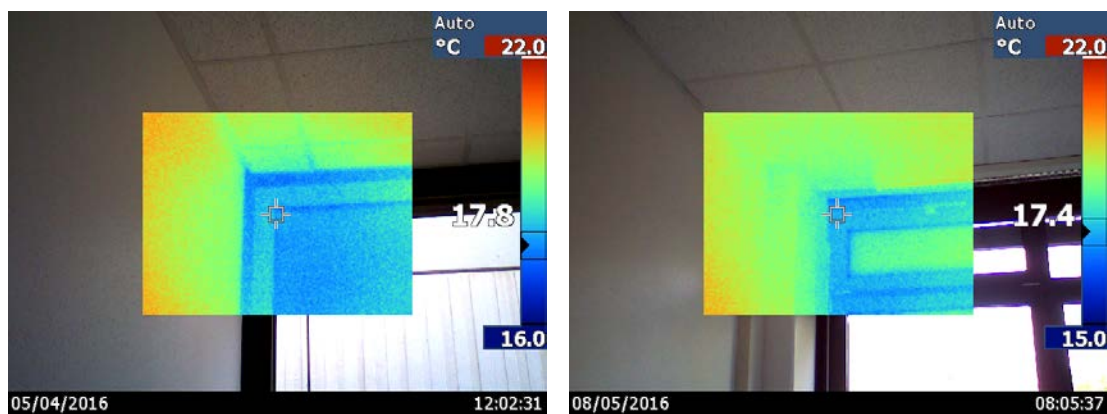


Abbildung 4.12: Wärmebrücke bei Zentralheizungs- (links) und Strahlerbetrieb (rechts)

4.5.5 Messung 8: Betrachtung insgesamt

Da die Untersuchung bei Messung 5 auf erschwerten Bedingungen basierte, wurde eine zusätzliche Messung durchgeführt, bei der allerdings eine allumfassende Betrachtung statt fand, d.h. bei der Innen- und Außentemperaturen, die verbrauchte Leistung sowie die effektive Betriebsdauer der Geräte einander gegenübergestellt wurden. Als Zeitraum dienten die Tage vom Freitag, dem 13. Mai 2016, bis einschließlich Mittwoch, dem 18. Mai 2016. Die IR-Heizung wurde auf eine Basistemperatur von 17 °C eingestellt und erhielt täglich ein neues Anforderungsprofil (siehe Abbildung D.8). Der Samstag sowie der Montag wurden trotz der Tatsache, dass es sich um einen Wochenend- bzw. einen Feiertag handelte,

als normale Werktage gewertet, da zu diesen Zeiten arbeitende Personen anwesend waren.

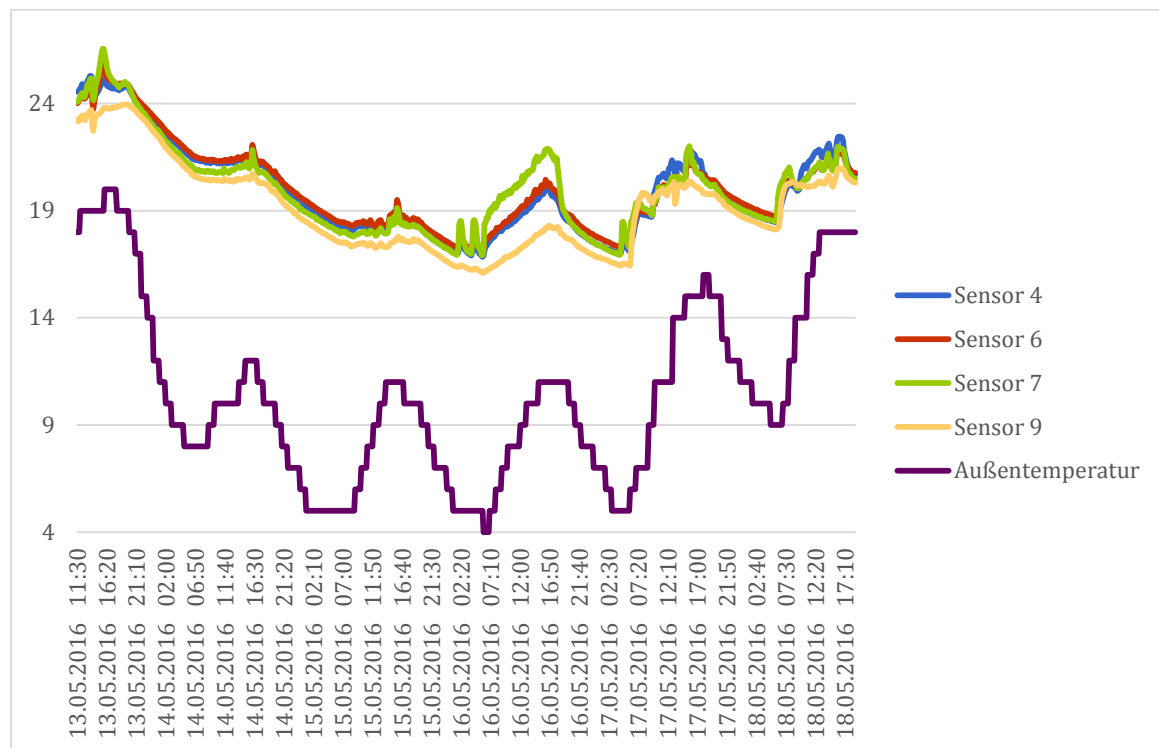


Abbildung 4.13: Innen- und Außentemperaturen Messung 8

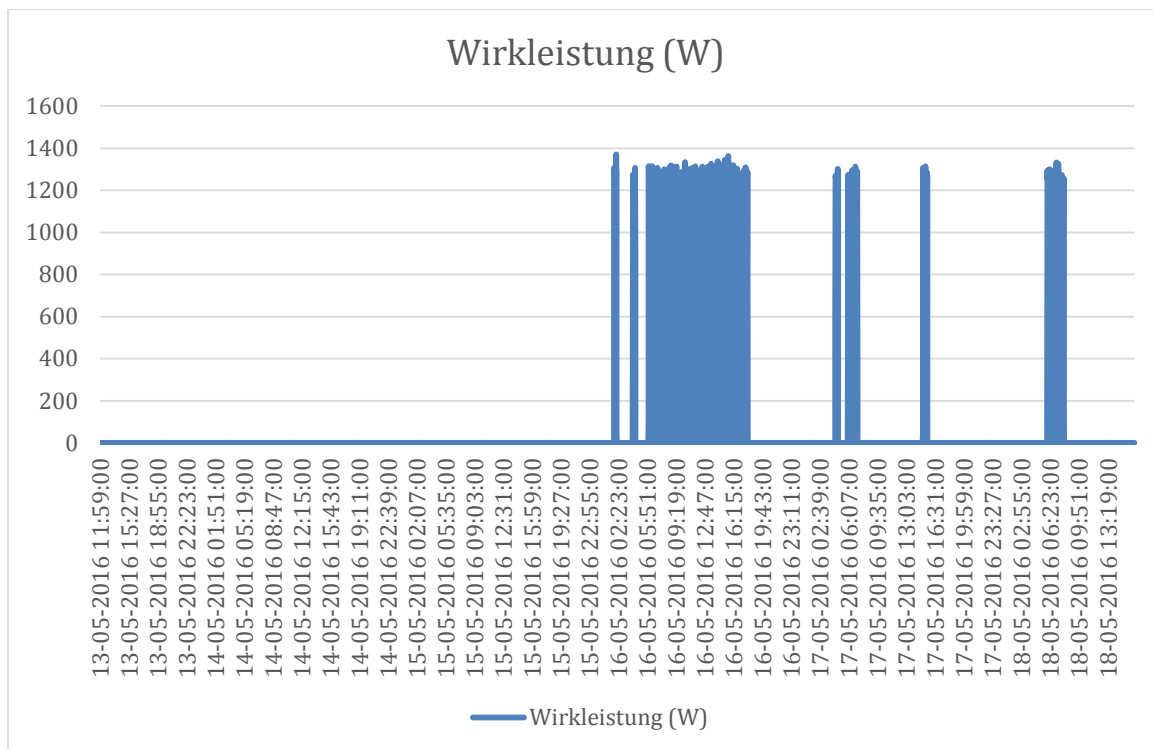


Abbildung 4.14: Wirkleistung Messung 8

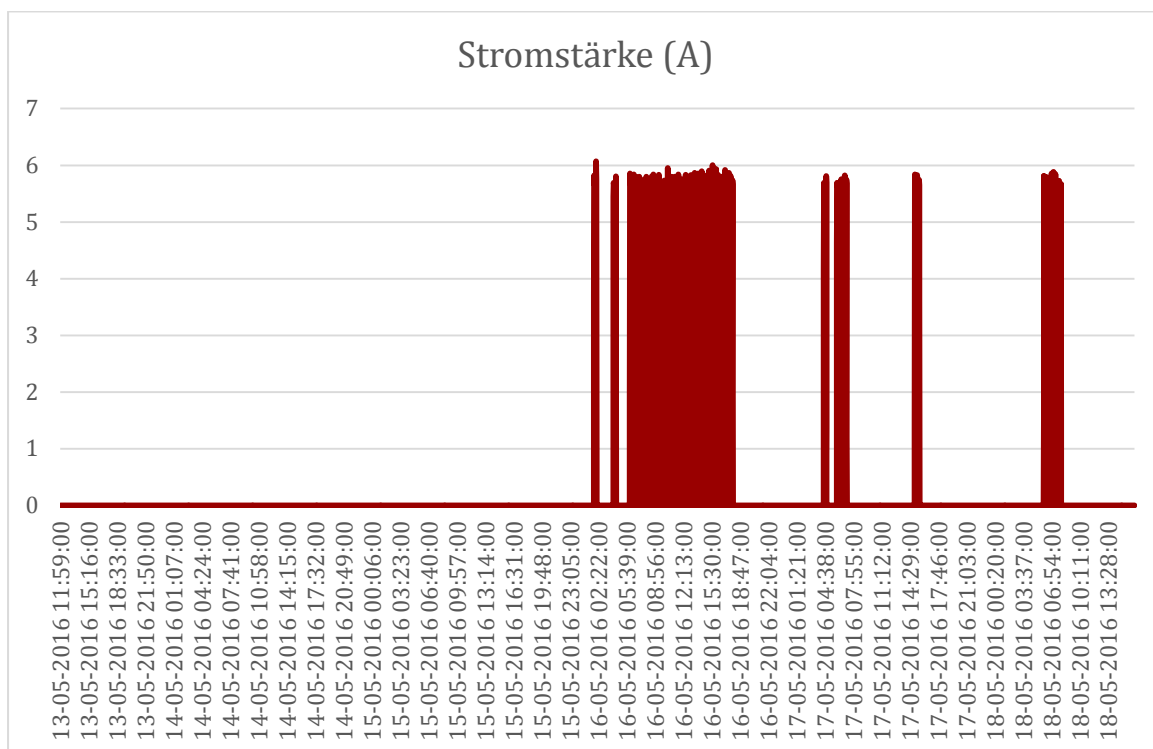


Abbildung 4.15: Stromstärke Messung 8

In Abbildung 4.13 ist deutlich die Abhängigkeit der Innen- von den Außentemperaturen nach [34] zu erkennen. So treten die Maxima der

Innentemperaturen stets zu den Zeitpunkten auf, an denen auch die Tageshöchsttemperaturen gemessen wurden. Besonders deutlich zeigt sich dies am Sonntag, dem 15. Mai, an dem die Solltemperatur auf lediglich 17 °C festgelegt worden war und bis in die späten Abendstunden auch nicht unterschritten wurde. Die vom Sensor 6 gemessene höchste Temperatur von knapp 19,5 °C lag dabei um 15:50 Uhr genau zu der Zeit vor, in der die Tageshöchsttemperatur von etwa 11 °C gemessen wurde.

In der Nacht vom 15. auf den 16. Mai zeigt sich wieder der typische, sägezahnförmige Verlauf der Temperaturkurve, was mit dem Abfall der Außentemperatur auf ein Minimum von 4 °C zusammenhängt und ein weiterer Hinweis dafür ist, dass der Raum einen vergleichsweise schlechten Dämmwert besitzt. Schon hier ist zu erkennen, dass die Temperaturdifferenz zwischen Sensor 9 und vor allem Sensor 7 stetig größer wird, bis hin zu einem Maximalwert von 3,66 °C, die höchste Temperaturdifferenz zwischen Sensor 4 und 9 beträgt dagegen 1,88 °C und fällt damit nur noch knapp in den für Behaglichkeit vorgeschriebenen Bereich.

Ferner lässt sich an dem Graphen auch die unterschiedliche Art des Temperaturanstiegs ablesen: Während sich am Montag, dem 16. Mai die Temperatur sprunghaft von 17 °C auf 21 °C erhöhte – was sich in dem schon bekannten steilen Anstieg der Sensormessungen widerspiegelt – wird bei gestufter Temperaturanhebung eine Kurve mit einem wesentlich geringeren Steigungsgrad erfasst, die dafür allerdings einen weniger glatten Verlauf aufweist. Interessanterweise überschreitet die Innentemperatur am Dienstag trotz einer um einige Grade höheren Außentemperatur die letztlich gewünschte Solltemperatur von 21 °C nur unwesentlich.

Positiv ist das Temperaturverhalten an Sensor 9 beim schrittweisen Auf- und Absenken zu werten: Im Gegensatz zu Messungen, in denen die Temperaturen sprunghaft erhöht wurden, gleicht sich der Verlauf seiner Temperaturkurve viel mehr dem der anderen Sensoren an.

Die Aufzeichnung des Leistungsverbrauchs lässt sofort erkennen, dass sich zwei Extreme herausbilden: Während vom Messbeginn bis zum Tagesanbruch des 16.

Mai kein Leistungsverbrauch verzeichnet wird, befinden sich die Strahler vom Morgen- bis zum Nachmittagsbereich des 16. Mai scheinbar im Dauerbetrieb, um die Solltemperatur von 21 °C zu halten. Besonders am 17. Mai ist dagegen deutlich die Aufheizphase morgens erkennbar. Die in dem Messzeitraum höchste gemessene Leistung liegt bei 1.370,87 W, die durchschnittliche bei 45,93 W.

Durch Ablesen des Displays des Energy Loggers 4000 ist außerdem der Energieverbrauch sowie die effektive Betriebszeit an den einzelnen Messtagen auswertbar (Tabelle 4.2). Die gesamte verbrauchte Energie für den Messzeitraum liegt folglich bei 6,348 kWh.

Tabelle 4.2: Betriebszeit und Energieverbrauch pro Tag

Tag der Messung	Betriebszeit/h	Energieverbrauch/kWh
13. Mai 2016	0	0
14. Mai 2016	0	0
15. Mai 2016	0	0
16. Mai 2016	8,916	4,540
17. Mai 2016	1,700	1,025
18. Mai 2016	1,250	0,783

5 Befragung und Auswertung

Für eine subjektive Bewertung unter realen Bedingungen wurden drei Befragungsrunden durchgeführt. Die erste Befragung fand während des Betriebs der Heizstrahler auf Grundlage des Heizprofils 1 (siehe Abbildung D.7) mit Studierenden statt, die regelmäßig im BCI-G2-E10 anwesend sind und dort arbeiten. Auch die zweite Befragung beruhte auf dem Heizprofil 1, bei dem jedoch an mehreren Tagen die Temperatur zwischen 19 °C und 21 °C schwankte. Die dritte Befragung fand am Samstag, dem 07. Mai 2016, von 9 bis 14 Uhr statt. Die Probanden wurden dabei jeweils unabhängig von Alter und Geschlecht ausgewählt und gebeten, lediglich Tätigkeiten nachzugehen, die unter den Punkt „leichte Arbeitsschwere im Sitzen“ fallen, wie beispielsweise lesen, am Computer oder dem mitgebrachten Laptop arbeiten, schreiben usw. Alle Probanden erhielten einen Fragebogen (siehe Abbildung D.9 und D.10), der auf Basis eines von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) erstellten Fragebogens zur thermischen Behaglichkeit im Büro erstellt wurde.

Mit den drei Befragungen galt es außerdem zu überprüfen, ob sich der zuvor errechnete Prozentsatz der mit der Klimasituation Unzufriedenen im Großen und Ganzen bewahrheitet. Ein direkter Vergleich erwies sich allerdings als schwierig, da PMV- und PPD-Werte an großen Probandengruppen ermittelt wurden, während es sich bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Testreihen um vergleichsweise kleine Gruppen handelte. Da zur genauen Bestimmung des PMV-Wertes im gegebenen Raum viele dazu erforderliche Größen nicht erfasst werden konnten, wurde auf die Berechnung mittels eines Rechnerprogramms verzichtet. Stattdessen wurde auf die im Anhang E der DIN EN ISO 7730 befindliche Tabelle zurückgegriffen. Unter der Voraussetzung, dass die Differenz zwischen Lufttemperatur und operativer Temperatur die 5 °C-Marke nicht überschreitet und für die relative Luftfeuchtigkeit ein Wert von 50 % angenommen werden kann, lässt sich durch die Kombination der Faktoren Kleidung, operative Temperatur, relative Luftgeschwindigkeit und Grad der körperlichen Tätigkeit das prognostizierte mittlere Votum mit einer Unsicherheit von besser als 0,1 PMV bestimmen. Da davon auszugehen ist, dass es stets einen maximalen Prozentsatz „Zufriedener“ von 95 %

gibt, ergibt sich selbst unter optimalen Bedingungen ein prognostizierter Anteil Unzufriedener von etwa 5 % und somit für den PMV-Index ein Wertebereich von -0,5 bis +0,5.

Aus besagter Tabelle der DIN EN ISO 7730 werden für einen Grad der körperlichen Tätigkeit von $69,6 \text{ W/m}^2$ (1,2 met) nun für die ersten beiden Befragungsrunden folgende Werte gewählt:

- Kleidung: $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$ (1,00 clo),
- operative Temperatur: $20 \text{ }^\circ\text{C}$,
- relative Luftgeschwindigkeit: $0,1 \text{ m/s}$ (nach [16], Tabelle A.5).

Eine Kombination dieser drei Werte führt zu einem PMV-Index von -0,33. Durch das Einsetzen in Formel (2.8) ergibt sich ein PPD von etwa 7,26 %.

Aufgrund angekündigter Außentemperaturen von etwa $20 \text{ }^\circ\text{C}$ am Tag der dritten und letzten Fragerunde erschienen die Probanden allerdings in überwiegend sommerlicher Bekleidung, der mit 0,75 clo ein niedrigerer Kleidungswiderstand als herkömmlicher Bürokleidung zugeordnet wird. Ausgehend von diesem niedrigeren Wert ergeben sich wiederum ein PMV-Index von -0,77 und damit ein PPD von etwa 17,49 %.

Neben der Bestimmung des Temperaturempfindens in Bezug auf die gesamte Gruppe sollten auch die TSV-Werte durch das Abfragen der derzeitigen thermischen Behaglichkeit und CSV-Werte bezüglich der thermischen Behaglichkeit an Kopf und Füßen in Erfahrung gebracht werden. Die CSV-Werte wurden zusätzlich erfragt, um einen Überblick darüber zu gewinnen, ob die theoretisch eintretende bessere Wärmeverteilung auch von den Probanden empfunden wird: Der Fall „unbehaglich kühl“ sollte daher idealerweise nicht auftreten.

Die CSV- und TSV-Werte geben das Empfinden der Testpersonen zum Zeitpunkt des Ausfüllens des Fragebogens wieder, während die restlichen Fragen, wie etwa das Wahrnehmen einer Temperaturänderung, eine Betrachtung des gesamten Befragungszeitraums erfordern.

5.1 Befragung 1: Normalbetrieb bei 21 °C

Die erste Befragung fand im Zeitraum der Messung 5 unter Verwendung des Heizprofils 1 statt. Es wurden fünf männliche Studierende Mitte 20 mit dem Fragebogen 1 (siehe Abbildung D.9) bezüglich ihrer thermischen Behaglichkeit seit der Inbetriebnahme der Heizstrahler konfrontiert. Zuvor wurde jedem Probanden der Fragebogen gezeigt und erklärt, auf welche Aspekte geachtet werden sollte.

5.2 Befragung 2: Temperaturabsenkung auf 19 °C

Zunächst wurde in dieser Befragung, die an Messung 8 gekoppelt war, mit Temperaturwerten aus der DIN EN ISO 7730 gearbeitet, so dass zu Beginn des Tests eine Ausgangstemperatur von etwa 21 °C herrschte. Um die Richtigkeit der Aussage, die Temperatur könne 2-4 °C niedriger gestellt werden, da die gefühlte über der tatsächlichen Temperatur liege, zu überprüfen, wurden die 21 °C des neuen Heizprofils, wie Abbildung D.8 zu entnehmen ist, am Mittwoch schrittweise bis auf 19 °C abgesenkt bzw. die Nachttemperatur von 17 °C am Dienstag langsam wieder auf 21 °C angehoben, ohne die anwesenden Personen darüber in Kenntnis zu setzen. Da in diesen Tagen keine Beschwerden dieser Personen eingingen, wurden die Temperaturen am Donnerstag und Freitag auf 19 °C abgesenkt.

Um die Befragungsergebnisse richtig einordnen zu können, muss man erwähnen, dass während dieser Woche angenehme Außentemperaturen mit einer aufgrund eines wolkenverhangenen Himmels geringen Sonnenstundenzahl herrschten, so dass sich ein Großteil der befragten Personen im Freien mit leichten Übergangsjacken aufhielt. Insbesondere die nur geringe Sonnenintensität kombiniert mit milden Temperaturen bot optimale Ausgangsbedingungen für das Regeln der Raumtemperatur mittels der Heizstrahler, deren Betriebszeit aus Tabelle 4.2, zuzüglich der 4,107 h Betrieb am 20. Mai, zu entnehmen ist.

5.3 Befragung 3: Ausgewählte männliche und weibliche Probanden

Da sich bei den ersten beiden Befragungen lediglich männliche Testpersonen im Raum befanden, soll nun besonderes Augenmerk auf die weiblichen Probanden gelegt werden. Der Grund dafür liegt vor allem darin, dass sich Frauen laut dem

Deutschen Grünen Kreuz in Marburg [35] hinsichtlich ihres Temperaturempfindens im Allgemeinen von Männern unterscheiden. Bei der dritten Befragung handelte sich um insgesamt 15 Probanden, sieben Frauen und acht Männer im Alter von 20 bis 26 Jahren.

Während der Morgenstunden wurde die Temperatur zunächst von den anfänglichen 17 °C auf 19 °C und nach kurzer Zeit weiter auf 21 °C angehoben. Nach einem Gewöhnungsintervall von etwa 45 Minuten wurde Zugluft durch das Öffnen eines Fensters und der Eingangstür erzeugt, so dass die Raumtemperatur rapide auf 20 °C sank und mittels der Regelung wieder auf die vorgeschriebenen 21 °C angehoben wurde.

Neben der Untersuchung der Temperaturwahrnehmung bei den weiblichen Probanden wurde die Lüftung vor allem deshalb durchgeführt, um die Aussage des Herstellers zu überprüfen, wonach der Raum schnell wieder als warm empfunden werde.

Ein Großteil der Teilnehmer verbrachte die gesamte Zeit damit, in einem Sitzkreis in der Mitte des Raums Karten zu spielen, drei Teilnehmer besetzten jeweils einen Arbeitsplatz und gingen am Computer Schreibtätigkeiten nach.

5.4 Auswertung der Befragungen

Die Auswertung der drei Befragungsrunden, die unter jeweils unterschiedlichen Nebenbedingungen durchgeführt wurden, ist in den folgenden Tabellen 5.1 bis 5.6 aufgeführt.

Tabelle 5.1: Bewertung des Temperaturempfindens mit kalt (-3), kühl (-2), leicht kühl (-1), neutral (0), leicht warm (1), warm (2), heiß (3)

Befragung	Anzahl Beurteilungen	Bewertung des Temperaturempfindens						
		-3	-2	-1	0	1	2	3
1	5 (=100%)	0%	20%	40%	40%	0%	0%	0%
2	5 (=100%)	0%	20%	40%	40%	0%	0%	0%
3	15 (=100%)	0%	0%	7%	40%	47%	6%	0%

Tabelle 5.2: Bewertung der thermischen Behaglichkeit mit intolerabel (-4), sehr unbehaglich (-3), unbehaglich (-2), leicht unbehaglich (-1), behaglich (0)

Befragung	Anzahl Beurteilungen	Bewertung des Behaglichkeitsempfindens				
		-4	-3	-2	-1	0
1	5 (=100%)	0%	0%	0%	40%	60%
2	5 (=100%)	0%	0%	0%	20%	80%
3	15 (=100%)	0%	0%	20%	40%	40%

Tabelle 5.3: Thermische Präferenz mit viel kälter (-3), kälter (-2), ein wenig kälter (-1), keine Änderung (0), ein wenig wärmer (1), wärmer (2), viel wärmer (3)

Befragung	Anzahl Beurteilungen	Thermische Präferenz						
		-3	-2	-1	0	1	2	3
1	5 (=100%)	0%	0%	60%	40%	0%	0%	0%
2	5 (=100%)	0%	0%	0%	80%	20%	0%	0%
3	15 (=100%)	0%	7%	53%	33%	0%	7%	0%

Tabelle 5.4: Thermische Behaglichkeit am Kopf

Befragung	Anzahl Beurteilungen	Thermische Behaglichkeit am Kopf		
		unbehaglich kühl	behaglich	unbehaglich warm
1	5 (=100%)	0%	100%	0%
2	5 (=100%)	0%	100%	0%
3	15 (=100%)	0%	87%	13%

Tabelle 5.5: Thermische Behaglichkeit an den Füßen

Befragung	Anzahl Beurteilungen	Thermische Behaglichkeit an den Füßen		
		unbehaglich kühl	behaglich	unbehaglich warm
1	5 (=100%)	40%	60%	0%
2	5 (=100%)	40%	60%	0%
3	15 (=100%)	0%	73%	27%

Tabelle 5.6: Vergleich zwischen Konvektions- und Strahlungsheizung

Befragung	Anzahl Beurteilungen	Vergleich (Mehrfachnennungen möglich)			
		behaglicher	unbehaglicher	zu warm	zu kalt
1	5 (=100%)	80%	20%	0%	20%
2	5 (=100%)	40%	60%	0%	20%
3	15 (=100%)	80%	13%	20%	0%

Bei der ersten Befragung bewertete der Großteil der täglich anwesenden Personen das vorherrschende Raumklima als „leicht kühl“, ein ebenso großer Anteil gab an, es

als behaglich zu empfinden, dabei jedoch allgemein zu kühleren Umgebungstemperaturen tendiere. Die Außentemperaturen, die zur Zeit der ersten Befragungsrunde herrschten, waren von allen Befragungsrunden die niedrigsten, so dass hier besonders die 40 %, die die thermische Behaglichkeit an den Füßen mit „unbehaglich kühl“ bewerteten, stark ins Gewicht fallen.

Trotz leicht erhöhter Temperaturen zum Zeitpunkt der zweiten Befragung ändert sich die Bewertung hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit am Kopf und auch an den Füßen nicht. Klare Unterschiede sind dagegen bei der thermischen Präferenz festzustellen, bei der sich ein deutlich positiveres Bild als in der Befragungsrunde zuvor ergibt.

Die Auswertung der dritten Befragung ergibt, dass die Testumgebung im Großen und Ganzen als behaglich eingestuft wurde. Die Unbehaglichkeit tendierte insgesamt eher zu einer als zu warm empfundenen Raumtemperatur, was jedoch auch an den vergleichsweise rasch ansteigenden Außentemperaturen und den einfallenden Sonnenstrahlen liegen könnte, wodurch der Raum ab etwa 12 Uhr anfang, sich schnell zu erhitzen.

Nach dem Lüften stellt sich bei den Probanden im Schnitt nach 9:20 min wieder ein behagliches Gefühl ein. Dies lässt sich darauf zurückzuführen, dass kein vollständiger Einbruch der Raumtemperatur eintritt, sobald ein Fenster geöffnet wird, wie es beispielsweise in Messung 2 der Fall war. Vor allem die Wände wie auch die im Raum aufgestellten Möbel und Geräte fungieren hier als Wärmespeicher. Während bei konventionellen Heizsystemen die Luft erwärmt wird, die beim Lüften allerdings entweicht, bleibt die Wärme vor allem durch die Wände erhalten und gibt diese wieder an das Rauminnere ab.

6 Diskussion

Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit war es, die von der Firma BioHeatPlus gelieferten Heizstrahler mithilfe objektiver Messungen und subjektiver Bewertungen auf ihre Energieeffizienz hin zu untersuchen. Ausgangspunkte waren dabei die Thesen des Herstellers auf seiner Internetseite [30]. Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass die Auswertung und Überprüfung der Ergebnisse in einigen Fällen unter bestmöglicher Abschätzung von Rahmendaten vorgenommen werden musste, da eine durchgängige Überwachung des Raums rechtlich nicht möglich war.

6.1 Überprüfung der Kenndaten

Bevor die vom Hersteller vorgebrachten Thesen zur Sprache kommen, soll der Übersicht halber zunächst auf die wichtigsten Kenndaten eingegangen werden.

Tabelle 6.1: Gegenüberstellung Herstellerangaben vs. Messdaten

	Herstellerangaben	Messdaten
maximale Stromstärke	5,20 A	6,07 A
maximale Leistung	1.200,00 W	1.370,87 W
durchschnittlicher Energieverbrauch	0,311 kW	0,317 kW (Messung 5) 0,394 kW (Messung 8)

6.1.1 Stromverbrauch

Wie aus Tabelle 6.1 hervorgeht, lassen sich Unstimmigkeiten zwischen Herstellerinformationen und den Messungen feststellen: Trotz einer in [30] aufgeführten maximalen Stromstärke von 5,20 A wird diese Grenze zu mehreren Zeitpunkten bis hin zu einem Maximalwert von 6,07 A (bei Messung 8) überschritten.

6.1.2 Leistungsverbrauch und Energieverbrauch

Ähnlich verhält es sich mit dem Leistungs- und Energieverbrauch. Während die maximale Leistung mit 1.370,87 W in Messung 8 nur knapp den auf dem Datenblatt

angegebenen Wert von 1.200 W überschreitet, muss der durchschnittliche Energieverbrauch differenzierter betrachtet werden. Während dieser in der Messung 5, die bei Außentemperaturen von höchstens 14 °C bis 16 °C und unter erschwerten Bedingungen mit 0,317 kW nur leicht über den maximalen 0,311 kW liegt, ergibt sich bei der Messung 8 eine weit höhere Überschreitung: Der durchschnittliche Energieverbrauch liegt dort bei 0,394 kW. Dies wäre tolerierbar, allerdings fanden die Versuchsreihen im Rahmen der Bachelorarbeit in den Frühlingsmonaten bei milden Außentemperaturen statt, so dass solche Überschreitungen in kälteren Jahreszeiten sehr viel stärker ins Gewicht fallen könnten.

6.2 Überprüfung der Hersteller-Thesen

Auf seiner Internetseite macht BioHeatPlus unter dem Punkt „Energie und Kosten sparen“ verschiedene Versprechungen, die auf ihren Wahrheitsgehalt überprüft wurden.

6.2.1 Energieeffizienz

Die 96 % Wirkungsgrad, die [30] zufolge von den Heizsystemen des Herstellers erreicht werden, gelten nach seinen eigenen Aussagen lediglich für gut gedämmte Gebäude und Räume; eine Erklärung zum Verlust der verbleibenden 4 % wird nicht gegeben. Somit bleibt unklar, wie diese Angabe bestimmt wurde und wie es zu den Verlusten kommt.

Bezogen auf die Testumgebung und die dort durchgeführten Messungen lässt sich sagen, dass – abgesehen davon, dass die genaue Bestimmung des Wirkungsgrades unklar bleibt – sich hier ein schlechterer Wert ergeben muss, der auf durch die Isolationseigenschaften des Raumes beruhenden Wärmeverluste zurückzuführen ist. Da die Isolationseigenschaften in Verbindung mit der Bauphysik im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden, wären hier weitere Messungen erforderlich. Bestätigt wird diese Überlegung durch mehrere Berechnungen – als Beispiel sei hier die Berechnung des Beratungsunternehmens Energieheld [33] zu nennen –, die als Voraussetzung für eine energieeffiziente Heizleistung einen guten Dämmzustand des Gebäudes vorschreibt. Besonders gut war die optimierbare

Dämmung des Testraumes anhand der ersten Wärmebilder zu erkennen: Im Bereich der Fenster kam es zu einer starken Ausbildung von Wärmebrücken. Auch bei ersten Gesprächen mit den Testpersonen der Befragungen 1 und 2 offenbarte sich schnell, dass sie den Raum bei kalten Temperaturen oft als unangenehm kühl, bei warmen Temperaturen mit hohem Sonnenanteil dagegen fast schon als unangenehm warm und stickig empfanden.

Als Zwischenfazit lässt sich demnach sagen, dass die Energieeffizienz der Strahler stark von den Dämmeigenschaften des jeweiligen Raumes abhängt. In der genutzten Testumgebung ist somit die Energieeffizienz, wie sie vom Hersteller angepriesen wird, bereits theoretisch auszuschließen. Um dies mit Sicherheit bestätigen zu können, wäre es von Vorteil, mit weiteren Messungen den Wärmebedarf des jeweiligen Raumes zu ermitteln und zu untersuchen, ob sich dieser mit einem geringeren Leistungsaufwand der IR-Strahler decken ließe als mit einer konventionellen Heizung. Im Falle der IR-Heizung ist mangels Energiespeicherung die Neuberechnung des Wirkungsgrads über die Leistung möglich.

6.2.2 Energieverbrauch pro Stunde

Zunächst ist zu erwähnen, dass BioHeatPlus bei der Formulierung seiner These bezüglich des Energieverbrauchs pro Stunde die Begriffe „Leistung“ und „Energie“ ein wenig durcheinanderzubringen scheint. So heißt es, dass der *Energieverbrauch* in der Aufheizphase bei etwa 300 W liegt.

Einen guten Anhaltspunkt für die Beurteilung der *Leistungsaufnahme* bietet die sich deutlich nachweisbare Aufheizphase am 17. Mai von 6:00 bis etwa 7:00 Uhr bei der Messung 8, bei der sich für diesen Zeitraum ein Mittelwert von 387,52 W ergab. Allerdings handelte es sich bei dieser Aufheizphase lediglich um eine Temperaturanhebung auf 18 °C. Am 18. Mai dagegen, an dem die Außentemperaturen zum Zeitpunkt des morgendlichen Aufheizens auf 21 °C wesentlich höher waren, erstreckt sich das Intervall auf einen Zeitraum von 5:59 bis 8:00 Uhr und verzeichnet eine Durchschnittsleistung von 388,15 W in der ersten und 299,47 W in der zweiten Stunde. Die Messergebnisse liegen damit in einigen Fällen über dem angegebenen Wert. Zugunsten des Herstellers muss allerdings gesagt werden, dass er in einem Unterpunkt erwähnt, dass der Verbrauch in

ungedämmten Häusern über den angegebenen 300 W liegen kann. Im Allgemeinen wäre es der Übersicht halber jedoch besser, in den Datenblättern einen Wert pro m² anzugeben, der nach [33] bei etwa 60 W, bei schlecht gedämmten Räumen darüber liegt.

Der gemessene Energieverbrauch von 0,783 kWh vom selben Tag ist zugleich auch die in dieser Aufheizphase verbrauchte Energie, da die Heizstrahler an diesem Tag zu keinem anderen Zeitpunkt angesprungen sind.

Insgesamt ist es schwierig, allgemein eine „Aufheizphase“ zu definieren. Zum einen ist die Länge und Intensität dieser Phase von der eingestellten Solltemperatur abhängig, zum anderen sind auch der Zustand des Raums sowie die jeweilige Periode (Sommer oder Winter) nicht ohne Einfluss auf die Aufheizphase. Somit ist es nicht ohne Weiteres vorhersehbar, wie viel Leistung, Strom und Zeit das Gerät oder die Geräte verbrauchen, um die Raumtemperatur um die gewünschte Temperatur anzuheben.

Das nur allmähliche Absinken der Temperatur nach dem Herunterregeln der Solltemperatur sowie das von den Testpersonen schnell empfundene Aufheizen nach dem Lüften sind an der Stelle demnach zwar als positive Nebeneffekte zu nennen, die den Energieverbrauch durch präzise Nutzung und Einstellung der Heizprofile deutlich senken können, jedoch wird die Solltemperatur bei Nutzung der IR-Strahler morgens durchschnittlich erst in etwa drei Stunden (siehe Abbildung 4.9) erreicht, während die Zentralheizung im Schnitt lediglich etwa eine Stunde (siehe Abbildung 4.7) dafür benötigt.

6.2.3 Energiespartaktung

Im Zuge der Klimaerwärmung und den daraus resultierenden wärmeren Außentemperaturen verschieben sich nicht nur die Jahreszeiten, sondern mit ihnen auch die Heizperioden. Infolge dessen erscheint es im Sinne der Energieeinsparung durchaus effizient, dass sich die Geräte mithilfe der Energiespartaktung abschalten, wenn die Temperaturen etwa unvorhergesehen – d.h. noch in der eigentlichen Heizperiode – so weit ansteigen, dass ein Heizen nicht mehr nötig wäre.

Energieeinsparungen sind auch durch das effiziente Nutzen der Nachtabenkung möglich (siehe Kapitel 6.2.5). Um bewerten zu können, inwiefern das Ergebnis der Messung 6 einen Hinweis zur Energieeffizienz des untersuchten Geräts liefern kann, werden die Kriterien für Temperaturzyklen nach DIN EN ISO 7730 und typische Aufenthaltszeiten in einem Büro einander gegenübergestellt. Temperaturzyklen können durch Temperaturregelung in einem Raum – hier in einem Büro – entstehen, zeigen allerdings keine Auswirkungen auf die thermische Behaglichkeit, „falls die Spitze-Spitze-Schwankung weniger als 1 K beträgt“ [16]. Laut Aussagen von im Büro beschäftigten Angestellten wird die typische Zeit des Verlassens des eigenen Büros auf spätestens 18:00 Uhr geschätzt. Wird nun von einem Zeitintervall von etwa 2:30 h ausgegangen, in dem die Temperatur um 1 °C abfällt, wäre eine Temperaturabsenkung bereits ab 15:30 Uhr möglich, was ein wichtiger Pluspunkt für die versprochene Energieeffizienz von IR-Heizstrahlern wäre. Dies müsste über einen längeren Messzeitraum geprüft werden; bei Bestätigung der Hypothese wäre dies bei gleichzeitig geschickter Nutzung der Energiespartaktung ein starkes Argument für die Energieeffizienz der IR-Strahler.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse aus den Messungen 1 bis 3 zeigt sich allerdings, dass die Rauminnentemperatur auch bei Nutzung der Konvektionsheizung nur langsam absinkt. In dem Sinne hat das IR-Heizsystem bezüglich der Temperaturhaltung zumindest den genutzten Testraum betreffend der Konvektionsheizung gegenüber keinen Vorteil.

6.2.4 Temperaturempfinden

Beim Vergleich der Ergebnisse aus Befragung 1 und 2 fällt auf, dass trotz Absenkung der Temperatur hinsichtlich des Temperaturempfindens kein Unterschied bemerkt wurde. Bestätigt wird dies durch die Auswertung der Fragebögen der zweiten Befragung. Daraus geht hervor, dass die unangekündigte Temperaturabsenkung von 21 °C bis auf letztlich 19 °C nicht wahrgenommen wurde. Die 73 % der Probanden aus der Befragung 3, die kaum eine Temperaturänderung wahrgenommen haben, unterstützen die Ergebnisse der Befragung 2, bei der die langsame Temperaturabsenkung auf 19 °C ebenfalls kaum bis gar nicht wahrgenommen

wurde. Somit könnte das Einstellen einer niedrigeren Temperatur für bürotätige Personen tatsächlich hinnehmbar sein.

Aufgrund der starken Schwankungen hinsichtlich der Temperaturdifferenzen zwischen den Sensorpositionen lässt sich wenig über die Wärmeverteilung sagen: Während sie bei der Messung 4.2, bei der allerdings keine Personen im Raum waren, insbesondere in Bezug auf die Differenz zwischen Kopf- und Fußbodentemperatur vergleichsweise gut abschneidet, wird bei der Messung 8 mit $\Delta\vartheta_{S,as} = 1,88$ K ein bereits kritischer Wert erreicht. Dies spiegelt sich auch in den Befragungen 1 und 2 wider, bei der dieselben Probanden zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten befragt wurden. Der Punkt „thermische Behaglichkeit an den Füßen“ erbrachte dabei in beiden Runden dasselbe Ergebnis: Der Großteil der befragten Personen empfand die Temperatur in unmittelbarer Nähe der Füße als „unbehaglich kühl“, womit sich die Aussage des Herstellers, es gäbe keine fußkalten Bereiche mehr, nicht bestätigt hat.

Tabelle 6.2: Temperaturdifferenzen

	Messung 3	Messung 4.2	Messung 8
Kopf vs. Fußboden	1,31 K	0,66 K	1,88 K
Decke vs. Fußboden	1,75 K	1,84 K	3,66 K

Als zusätzlich unangenehm wurde bei der Nutzung der IR-Strahler die punktuelle Wärme empfunden, die von einigen Probanden der drei Befragungsrunden wahrgenommen wurde; demgegenüber bezeichneten die Probanden der 1. und 2. Befragungsrunde die Luft im Winter bei Zentralheizungsbetrieb als stickig.

6.2.5 Wärmespeicher

Ein zunächst theoretischer Vorteil von IR-Heizungen gegenüber konventionellen Heizungen besteht darin, dass sie zwar länger brauchen, um einen Raum aufzuheizen, die Temperatur jedoch vergleichsweise lange halten, da Objekte im Raum als Wärmespeicher dienen. Dies ist vor allem ein Vorteil beim Lüften, da die Wärme nicht wie bei Konvektionsheizungen von der Luft gespeichert wird, die durch das Fensteröffnen entweicht. Nach Aussagen der Probanden wird das Raumklima schneller wieder als behaglich empfunden als bei konvektiven

Heizsystemen, was vor allem in der Winterperiode vorteilhaft ist. Dieser Effekt ist auch beim Vergleich der Messwerte mit und ohne IR-Strahler gut zu erkennen, da im ersteren Fall die typischen Temperatureinbrüche, die vor allem bei kalten Außentemperaturen beim Öffnen des Fensters entstehen, kaum bis gar nicht mehr zu sehen sind.

Durch die Aufwärmung der Wände soll nach Aussagen des Herstellers auch die Wärmebrückenbildung vermindert werden. Die Aufnahmen der Wärmebildmessung scheinen dies zu belegen, allerdings ist nicht klar, ob dies nicht auf die erhöhten Außentemperaturen zurückzuführen ist. Ausgehend von der Annahme, dass die Wände tatsächlich effektiv die Wärme aufnehmen, würde sich auch die Herstelleraussage zu verminderter Feuchtigkeit bestätigen und demzufolge auch der daraus resultierende Vorteil des sinkenden Risikos in Bezug auf Schimmelbildung in den Räumen.

6.2.6 Geeignete Positionierung

Laut Aussagen des Herstellers kann die Energieeffizienz der IR-Strahler wesentlich durch den Gebäudezustand erhöht werden, da der Energieverbrauch sinkt, je besser die Dämmung des Gebäudes ist. Steht die Überlegung im Raum, das gesamte Gebäude gleichmäßig temperieren und eine Infrartheizung als alleiniges Heizsystem nutzen zu wollen, sollte auf die bauphysikalischen Eigenschaften dieses Gebäudes geachtet werden. Zwar gilt der Aspekt der guten Dämmung für jedes Heizsystem gleichermaßen, allerdings ist bei strombasierten IR-Heizungen stets zu bedenken, dass durch den Verbrauch von Strom zum Heizen entsprechend hohe Kosten anfallen können.

Die Aussagen einiger Probanden, die von der Wärmequelle abgewandte Körperseite sei als spürbar kühler empfunden worden, legen nahe, dass sich ein Büroraum, in dem die arbeitenden Personen oftmals über mehrere Stunden in einer nahezu unverändert sitzenden Position verharren, nur bedingt für die Nutzung dieses Heizsystems eignet. Zwar gab ein Großteil der Testpersonen an, er habe das Raumklima als behaglicher empfunden als bei Nutzung konventioneller Heizmethoden; allerdings wäre hier zu prüfen, welche Auswirkungen das

Empfinden der punktuellen Wärme bei kalten Außentemperaturen und dem damit verbundenen Mehrbetrieb der Heizstrahler auf die Behaglichkeit hätte.

An Orten, an denen punktuelle Wärme nicht störend oder eventuell sogar erwünscht ist, könnte sich ein IR-Heizsystem jedoch bezüglich der thermischen Behaglichkeit als durchaus nützlich erweisen, wie beispielsweise im therapeutischen Bereich. Auch im Badezimmer könnte vor allem statt durchgängigen Badezimmerheizungsbetriebs durch eine Taktung, die die Geräte erst bei Personenanwesenheit aktiviert, Energie eingespart werden.

6.2.7 Vergleichende Kostenrechnung

Bei der Entscheidung für eine elektrisch-basierte IR-Heizung muss dem Verbraucher bewusst sein, dass er sich mit Strom für die teuerste Art des Heizens entscheidet [36].

Um die Wärmeverteilung optimal zu unterstützen, empfiehlt sich der Kauf mehrerer kleiner Anlagen mit beispielsweise 500 W Leistung. Ausgehend von der Annahme, pro m² sei eine Leistung von 60 W bei gut gedämmten und 100 W bei schlecht gedämmten Gebäuden nötig, und bei einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 1.440 Stunden/Jahr (8 Stunden Heizdauer bei 180 Tagen Heizbetrieb) ergeben sich jährliche Heizkosten von etwa 600 bis 1.000 Euro.

Tabelle 6.3: Jährlich anfallende Heizkosten nach [36]

25 m ² Wohnfläche	Gut gedämmt (60 W pro m ²)	Schlecht gedämmt (100 W pro m ²)
Benötigte Heizleistung	1,5 kW (3x500 W)	2,5 kW (5x500 W)
Heizdauer pro Jahr	1.440 Stunden (180 Tage)	1.440 Stunden (180 Tage)
Heizenergie pro Jahr	2.160 kWh	3.600 kWh
Anschaffungskosten	1.000 – 1.200 €	1.800 – 2.000 €
Heizkosten pro Jahr	ca. 600 € pro Jahr	ca. 1.000 € pro Jahr

6.3 Energiebedarfsunabhängige Bewertungskriterien

Neben den Aspekten des Energieverbrauchs und der anfallenden Kosten ergeben sich noch einige weitere erwähnenswerte Effekte: Die leichte Installation, eine lange Lebensdauer und Wartungsfreiheit erhöhen die Attraktivität der IR-Strahler für den Verbraucher. Laut [37] ergibt sich dadurch, dass die Raumluft weniger stark erwärmt und im Vergleich zur Konvektion auch weniger aufgewirbelt wird, ein höherer Hygienestandard.

7 Zusammenfassung

In der heutigen Gesellschaft wird immer mehr Wert auf eine bewusste und nachhaltige Lebensweise gelegt, insbesondere im Hinblick auf die Energienutzung, wobei die Motivation oftmals eine mögliche Kosteneinsparung ist. Um jedoch eine sachliche Beurteilung hinsichtlich als energieeffizient vermarkteter Geräte vornehmen zu können, ist die Betrachtung einzelner Komponenten und den mit ihnen verbundenen Vor- und Nachteilen erforderlich.

Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit wurden die IR-Heizstrahler der Firma BioHeatPlus auf die vom Hersteller gemachten Aussagen einerseits und ihre Energieeffizienz andererseits getestet.

Die Energieverbrauchsdaten in der Aufheizphase weisen stets starke Schwankungen auf, bewegen sich allerdings immer im Bereich der 0,3 kWh, die in den Herstellerangaben zu finden sind. Aufgrund des schlecht gedämmten Zustands des Testraums liegen die Werte in den meisten Messungen darüber; auf die Frage, um wie viele zusätzliche kWh es sich in solchen Fällen handelt, wird vom Hersteller allerdings nicht eingegangen. Der angegebene Wirkungsgrad von 96 %, der dem Verhältnis von genutzter zu eingesetzter Energie entspricht, wird vom Hersteller selbst insofern relativiert, als dass dieser Wert nur für sehr gut gedämmte Räume gelte. Eine Erklärung, wo die verbleibenden 4 % verloren gehen, wird vom Hersteller nicht gegeben.

Eine eindeutig positive Eigenschaft der IR-Heizstrahler ist die Energiespartaktung, die mithilfe der Funksteuerung und des Raumthermostats wirklich nur dann anspringt, wenn die Raumtemperatur unter die Solltemperatur sinkt. So ist es in der Untersuchungsphase oft vorgekommen, dass sich mangels Notwendigkeit die Heizstrahler nicht aktivierten. Insbesondere in den Monaten des Übergangs von kalten zu warmen Perioden und im Hinblick auf die sich wegen der Klimaerwärmung verschiebenden Jahreszeiten führt dies zu Energieeinsparungen, womit die Heizstrahler also einen wichtigen Beitrag zur Energieeffizienz leisten. Da die Energiespartaktung der Geräte allerdings der Thermostatfunktion der Zentralheizungen entspricht, ergibt sich hier kein Vorteil gegenüber der bislang

genutzten Konvektionsheizung. Dennoch: Obwohl das Prinzip der Energiespartaktung die Grundfunktion einer jeden Heizung darstellt und oft primär der Temperaturregelung dient, bildet die Energieeinsparung den positiven Nebeneffekt dieser Funktion.

Die Befragungen lieferten überwiegend positive Ergebnisse: Das Temperaturempfinden des Großteils der Probanden lag noch im als behaglich definierten Bereich, was sich mit der Bewertung des Behaglichkeitsempfinden (CSV) deckt.

Ein wichtiger Kritikpunkt ergibt sich bei der Betrachtung der Temperaturdifferenzen zwischen den unterschiedlichen Raumebenen, die laut Theorie, aber auch laut Aussagen des Herstellers, aufgrund der besseren Wärmeverteilung vergleichsweise klein sein sollen. Hier treten Schwankungen auf; auch ein Bruchteil von 40 % der regelmäßig anwesenden Probanden bewertete die Umgebungstemperatur an den Füßen als „unbehaglich kühl“.

Trotz allem würden die IR-Geräte mit hoher Wahrscheinlichkeit in gut gedämmten Räumen positive Ergebnisse liefern, da viele Begründungen bezüglich der Temperaturverläufe sowie Aussagen der Befragten auf Wettereinwirkungen zurückzuführen sind. Ob sie sich gegenüber anderen Heizsystemen als besser bewähren, ist an dieser Stelle allerdings fraglich: Die Zentralheizung der TU Dortmund verfügt beispielsweise über Ventile, die sich in Abhängigkeit von der Außentemperatur zu bestimmten Prozentgraden öffnen und schließen (siehe Abbildung E.5).

Die in der Bachelorarbeit getesteten Geräte sollten demzufolge möglichst in Räumen eingesetzt werden, die zum einen gut gedämmt und zum anderen nicht dazu gedacht sind, dass sich Personen über einen längeren Zeitraum in derselben Position aufhalten. Vor allem aber sind sie dann gut geeignet, wenn ein gewisser Grad an punktueller Wärme sowie ein zeitlich kurzes Erwärmen der Umgebung erwünscht sind, wie z.B. im therapeutischen Bereich.

Alles in allem lässt sich also sagen, dass vor allem die empfundene thermische Behaglichkeit unter die Vorteile dieses Heizsystems zählen lässt, Vorteile, zu denen

auch der nicht vorhandene CO₂-Ausstoß gehört. Für Verbraucher ergeben sich außerdem die als positiv zu bewertenden Nebeneffekte wie eine lange Lebensdauer, kein Aufwirbeln von Schmutz oder Staub, die leichte Installation und die Möglichkeit, das Heizelement mit Strom aus einer Photovoltaikanlage zu betreiben. Hierbei wäre jedoch zu prüfen, ob der Heizbedarf in der Winterperiode ohne Weiteres durch die Sonnenstrahlung als einzige Quelle gedeckt werden kann.

Die bessere Wärmeverteilung als einer der wichtigsten, vom Hersteller genannten Punkte ist dagegen nicht eingetreten. Um die versprochene Energieeffizienz zu erreichen, ist also nicht nur das Gerät selbst gefragt, sondern auch die Umgangsweise des jeweiligen Kunden.

8 Ausblick

Durch die Wahl eines schlecht gedämmten Raumes konnten viele Daten messtechnisch nicht genau erfasst werden. Um beurteilen zu können, wie energieeffizient IR-Strahler im Vergleich zu konventionellen Heizsystemen sind, wäre zum einen eine Untersuchung über einen längeren Zeitraum nötig, der idealerweise die Winterperiode mit einschließt, zum anderen ein gut gedämmter Raum, in dem stets Informationen über Personenanwesenheit und temperaturverändernde Vorkommnisse wie das Öffnen von Fenstern vorliegen. Da außerdem wenig über den Gebäudezustand bekannt war, wäre eine Untersuchung des neuen Testraumes hinsichtlich seiner bauphysikalischen Eigenschaften und des damit verbunden Energiebedarfs erforderlich.

Des Weiteren wären Messungen über längere Zeiträume im Hinblick auf die Kombination zweier Heizsysteme ein guter Anhaltspunkt beim Vergleich dieser: So wäre es beispielsweise denkbar, in Langzeiträumen (z.B. Wohnzimmer) konventionell und nur gelegentlich genutzte Räume (z.B. Badezimmer) per Infrarotstrahlung zu heizen.

Zuletzt wäre eine Untersuchung optischer Strahlungssicherheit solcher Systeme wichtig, die sich nicht auf die Qualität der Raumluft bezieht, sondern auf die Auswirkung der Infrarotstrahlung auf die Augen der Menschen und die Einhaltung der Expositionsgrenzwerte der Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung [38].

9 Literaturverzeichnis

- [1] DIMaGB Projekte, Konzepte, Beratung, *Energieverbrauch im Haushalt*. [Online] Available: <http://www.richtigbauen.de/info/en/pics1/en49.h1.gif>. Accessed on: 31.05.2016
- [2] *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energiesparverordnung), Energieeinsparverordnung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 24. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1789) geändert worden ist*. [Online] Available: http://www.gesetze-im-internet.de/enev_2007/BJNR151900007.html. Accessed on: 30.05.2016
- [3] Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen, *Heizen mit Strom*. [Online] Available: <http://www.verbraucherzentrale.nrw/tagung-stromheizung>. Accessed on: 14.05.2016
- [4] M. Pehnt, *Energieeffizienz*. 1. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg, 2010
- [5] Greenpeace e.V., *Der Plan – Deutschland ist erneuerbar*. Hamburg, 2015
- [6] P. von Böckh, T. Wetzels, *Wärmeübertragung, Grundlagen und Praxis*. 6. Auflage, Springer, Karlsruhe, Berlin Heidelberg, 2015
- [7] U. Müller, P. Ehrhard, *Freie Konvektion und Wärmeübertragung*. 1. Auflage, C.F. Müller, Heidelberg, 1999
- [8] Dr. S. Weber, K. Brückner, *Energietransport durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung*. [Online] Available: <http://www.physikdidaktik.uni-bayreuth.de/lehre/fachdidii/ws2003/Aufgabe2/brueckner.pdf>. Accessed on: 20.04.2016
- [9] DAA Deutsche Auftragsagentur GmbH, *Konvektionsheizung – mit Strom Raumluft erwärmen*. [Online] Available: www.heizungsfinder.de/elektroheizung/ratgeber/konvektion. Accessed on: 31.05.2016

- [10] Dr.-Ing. P. Kosack, *Bericht zum Forschungsprojekt „Beispielhafte Vergleichsmessung zwischen Infrarotstrahlungsheizung und Gasheizung im Altbaubereich“*. TU Kaiserslautern, Oktober 2009
- [11] H. Frank, *Electromagnetic Wave Spectrum*. [Online] Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum_c.svg. Accessed on: 02.05.2016
- [12] Sch (User), *Plancksches Strahlungsspektrum für Temperaturen von 100 K bis 10000 K in einem doppeltlogarithmischen Koordinatensystem*. [Online] Available: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=853053>. Accessed on: 29.05.2016
- [13] Webgeo, *Physik der Wärmestrahlung*. [Online] Available: http://www.webgeo.de/k_304/. Accessed on: 17.03.2016
- [14] Wikipedia, *Wärmestrahlung*. [Online] Available: https://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmestrahlung#cite_ref-2. Accessed on: 30.05.2016
- [15] P.O. Fanger: *Thermal Comfort*. Danish Technical Press, Kopenhagen, 1970
- [16] *Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*. DIN EN ISO 7730, Mai 2006
- [17] Prof. Dr.-Ing. N. Langner, M. Sc. M. Illner, *Thermische Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730 – Ein Ansatz zur vereinfachten Datenaufnahme und Berechnung für die Bewertung von Bürogebäuden*. Bauphysik, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, Band 27, Heft 3, 2015
- [18] S. Klauz, I. Plüss, U.-P. Menti, *Vergleich Energieeffizienz: Infrarot-Heizung vs. Wärmepumpen-Heizung*, Hochschule Luzern, Juni 2010

- [19] T. Fukazawa, N. Sunaga, K. Matsuda, Y. Chiba, M. Ozaki, *A Study on Thermal Comfort Range Considering Adjustment Actions by Residents*. Genf, 6.-8. September 2006
- [20] J.-H. Kim, Y.K. Min, B. Kim: *Is the PMV Index an Indicator of Human Thermal Comfort Sensation?* International Journal of Smart Home, Band 7, Heft 1, Januar 2013
- [21] W. Frank: *Raumklima und Thermische Behaglichkeit*. Berichte aus der Bauforschung, Wilhelm Ernst & Sohn KG, Berlin, Heft 104, 1975
- [22] K. Schild, W. M. Willems, *Wärmeschutz, Grundlagen – Berechnung – Bewertung*. 1. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, 2011
- [23] *Ergonomie der thermischen Umgebung – Bestimmung des körpereigenen Energieumsatzes*. DIN EN ISO 8996, 2004
- [24] *Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme*. DIN EN 11379, 2007
- [25] F.A. Chrenko: *The Effects of the Temperatures of the Floor Surface and the Air on Thermal Sensations and the Skin Temperature of the Feet.*, Brit. J. industr. Med., 1957
- [26] W. Kuntze: *Überholte Vorurteile gegen die Fußbodenheizung*. Sanitäre Technik, Heft 1, 1961
- [27] W. Frank: *Die Erfassung des Raumklimas mit Hilfe richtungsempfindlicher Frigorimeter*. GI 89, 1968, Heft 10, Seite 301-308
- [28] W. Koch, B. H. Jennings, C. M. Humphreys, *Is humidity important in the temperature comfort range?* ASHRAE Journ. 2, Heft 4, 1960
- [29] R. Pfluger, R. Schnieders, B. Kaufmann, W. Feist, *Hochwärmedämmende Fenstersysteme: Untersuchung und Optimierung im eingebauten Zustand*. Darmstadt, Mai 2003

- [30] BioHeatPlus, *Heizen mit Sonnenwärme*. [Online] Available: <http://bio-heat-plus.de/BioHeat/index.php/de/>. Accessed on: 31.05.2016
- [31] Carsten Witt: *Konzeptionierung und Aufbau einer Speicher- und Auswertungslogik für die Langzeitprotokollierung von Messdaten*. TU Dortmund, Januar 2016
- [32] Wärmebrücken Portal, *Welche Arten von Wärmebrücken gibt es?* [Online] Available: http://www.waermebrueckenportal.de/index.php?option=com_content&view=article&id=15&Itemid=15. Accessed on: 26.04.2016
- [33] wetter online, *Wetter im Rückblick*. [Online] Available: http://www.wetteronline.de/wetterdaten/dortmund?pcid=pc_rueckblick_data&gid=10416&pid=p_rueckblick_diagram&sid=StationHistory&iid=10410&month=04&year=2016&period=4¶id=SDLD. Accessed on: 18.04.2016
- [34] *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE Standard 55, 2013
- [35] Rhein-Zeitung online, *Dünnere Haut lässt Frauen schneller frieren als Männer*. [Online] Available: <http://archiv.rheinzeitung.de/on/05/02/08/service/gesundheit/t/rzo125771.html>. Accessed on: 31.05.2016
- [36] energieheld, *Die Infrarotheizung – Kosten, Größe, Vorteile und Nachteile*. [Online] Available: <http://www.energieheld.de/heizung/elektroheizung/infrarotheizung>. Accessed on: 31.05.2016
- [37] M. Friese, Dr.-Ing. A. Worch, *Wandheizungssysteme – Aktueller Stand der Diskussion*. Braunschweig, 2013
- [38] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, *Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung*. November 2013

Anhang A: Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Energieverbrauch im Haushalt [1]	4
Abbildung 2.1: Elektromagnetisches Spektrum [11]	10
Abbildung 2.2: Plancksches Strahlungsspektrum [12]	11
Abbildung 2.3: Zusammenhang zwischen dem vorausgesagten mittleren Votum (PMV) und dem Prozentsatz Unzufriedener (PPD) nach [16]	14
Abbildung 2.4: Thermische Behaglichkeit in Abhängigkeit von physiologischen, intermediären und physikalischen Einflüssen [22]	16
Abbildung 3.1: Funktionsskizze für die Nutzung der Funksteuerung.....	23
Abbildung 4.1: Grundriss der Testumgebung.....	26
Abbildung 4.2: Sensorpositionierung für die Messung 1	28
Abbildung 4.3: Innentemperaturen Messung 1	29
Abbildung 4.4: Sensorpositionierung für die Messung 2	31
Abbildung 4.5: Innentemperaturen Messung 2	31
Abbildung 4.6: Sensorpositionierung für die Messung 3	32
Abbildung 4.7: Innentemperaturen Messung 3	33
Abbildung 4.8: Positionierung der Heizstrahler	35
Abbildung 4.9: Innentemperaturen Messung 4.1.....	36
Abbildung 4.10: Innentemperaturen Messung 4.2	38
Abbildung 4.11: gemessene Wirkleistung Messung 5	40
Abbildung 4.12: Wärmebrücke bei Zentralheizungs- (links) und Strahlerbetrieb (rechts)	42
Abbildung 4.13: Innen- und Außentemperaturen Messung 8.....	43
Abbildung 4.14: Wirkleistung Messung 8.....	44
Abbildung 4.15: Stromstärke Messung 8.....	44
Abbildung C.1: Behaglichkeitsfelder für das Wertepaar Raumlufttemperatur/ mittlere Raumumschließungsflächentemperatur bei unterschiedlichen Tätigkeitsgraden nach [22]	75
Abbildung C.2: Behaglichkeitsfelder für das Wertepaar a) Raumlufttemperatur/ Fußbodentemperatur und b) Raumlufttemperatur/ Deckentemperatur nach [22]	75

Abbildung C.3: Behaglichkeitsfelder für das Wertepaar Raumlufttemperatur/relative Luftfeuchte nach [22]	76
Abbildung C.4: Behaglichkeitsfelder für das Wertepaar Raumlufttemperatur/ Luftgeschwindigkeit nach [22]	76
Abbildung D.1: Energy Logger 400 und Schaltsteckdose (links), Access Point (Mitte), Heizstrahler (rechts)	77
Abbildung D.2: Arbeitsplätze 2 und 3	77
Abbildung E.1: Datenblatt der IR-Strahler [30]	83
Abbildung E.2: Datenblatt der Sensoren, S.1.....	84
Abbildung E.3: Temperaturkurve der Sensoren.....	85
Abbildung E.4: Blockdiagramm aus dem Datenblatt der Sensoren	85

Anhang B: Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Bewertungsskala	13
Tabelle 2.2: Bewertung CSV nach [34]	15
Tabelle 2.3: Anhaltswerte für die Stoffwechselrate des Körpers nach [22]	17
Tabelle 4.1: Sensor-IDs	24
Tabelle 4.2: Betriebszeit und Energieverbrauch pro Tag	46
Tabelle 5.1: Bewertung des Temperaturempfindens mit kalt (-3), kühl (-2), leicht kühl (-1), neutral (0), leicht warm (1), warm (2), heiß (3)	50
Tabelle 5.2: Bewertung der thermischen Behaglichkeit mit intolerabel (-4), sehr unbehaglich (-3), unbehaglich (-2), leicht unbehaglich (-1), behaglich (0)	51
Tabelle 5.3: Thermische Präferenz mit viel kälter (-3), kälter (-2), ein wenig kälter (-1), keine Änderung (0), ein wenig wärmer (1), wärmer (2), viel wärmer (3)	51
Tabelle 5.4: Thermische Behaglichkeit am Kopf	51
Tabelle 5.5: Thermische Behaglichkeit an den Füßen	51
Tabelle 5.6: Vergleich zwischen Konvektions- und Strahlungsheizung	51
Tabelle 6.1: Gegenüberstellung Herstellerangaben vs. Messdaten	53
Tabelle 6.2: Temperaturdifferenzen	58
Tabelle 6.3: Jährlich anfallende Heizkosten nach [36]	60

Anhang C: Behaglichkeitsfelder

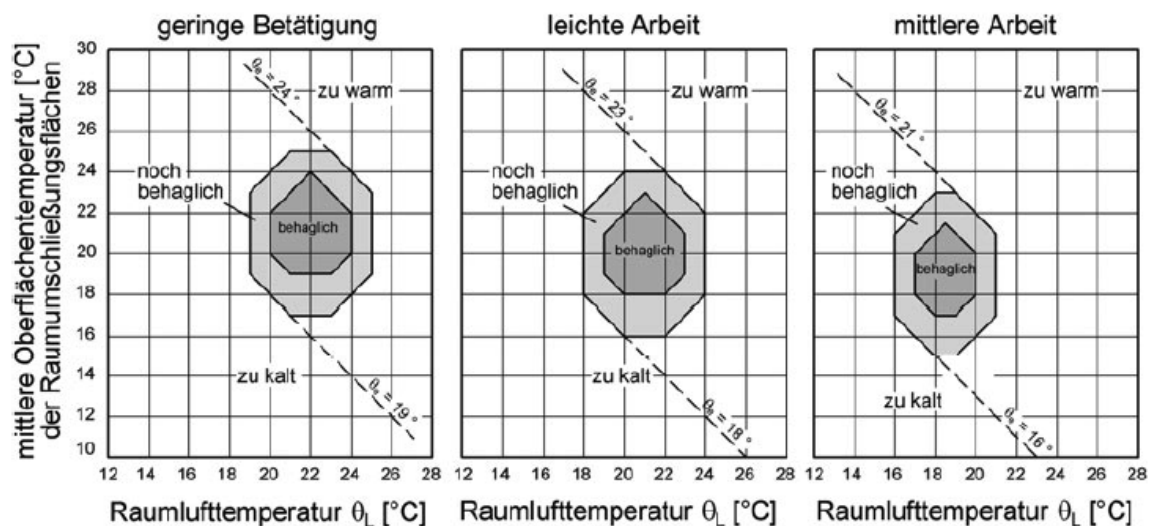


Abbildung C.1: Behaglichkeitsfelder für das Wertepaar Raumlufttemperatur/mittlere Raumschließungsflächen bei unterschiedlichen Tätigkeitsgraden nach [22]

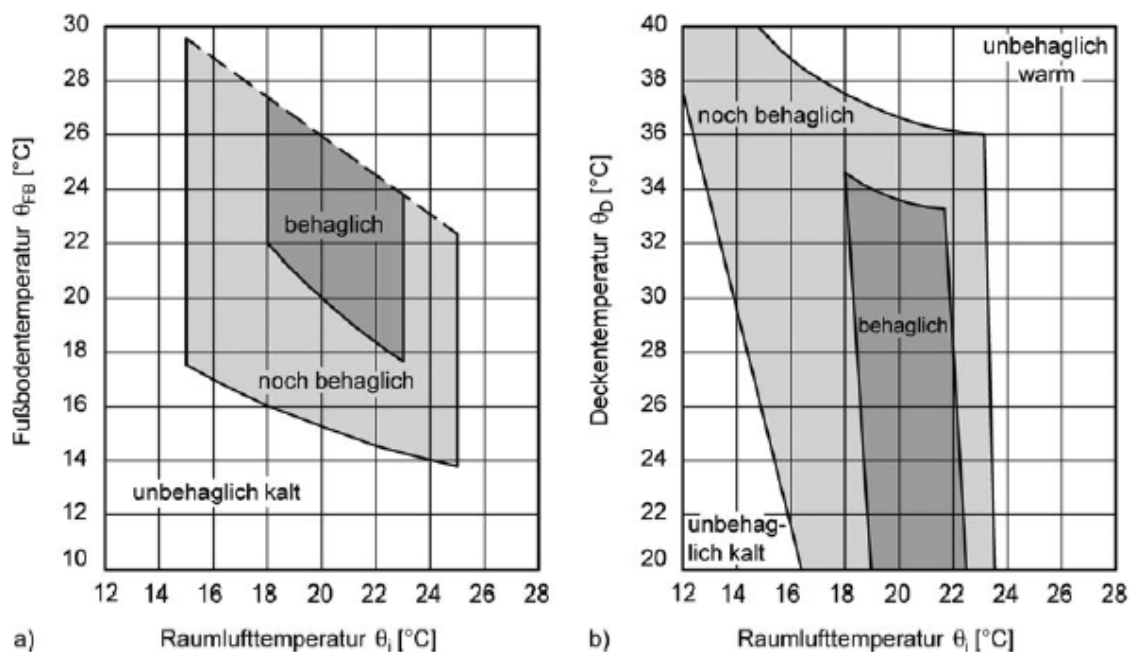


Abbildung C.2: Behaglichkeitsfelder für das Wertepaar a) Raumlufttemperatur/Fußbodentemperatur und b) Raumlufttemperatur/Deckentemperatur nach [22]

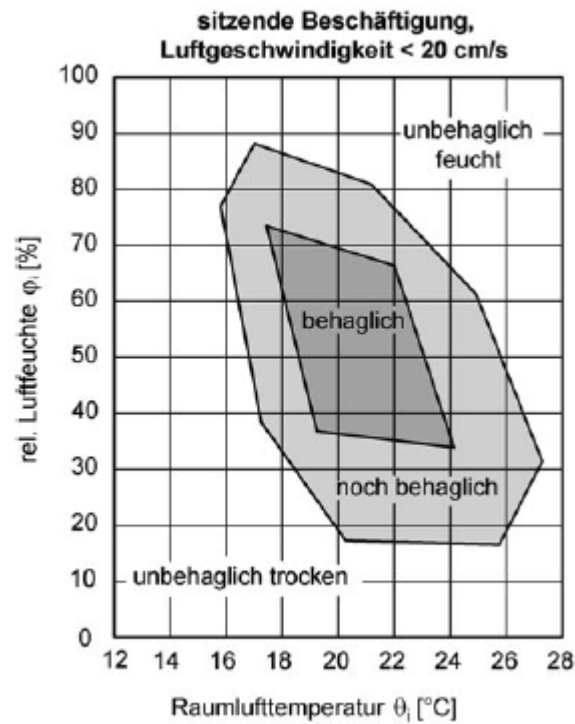


Abbildung C.3: Behaglichkeitsfelder für das Wertepaar Raumlufttemperatur/relative Luftfeuchte nach [22]

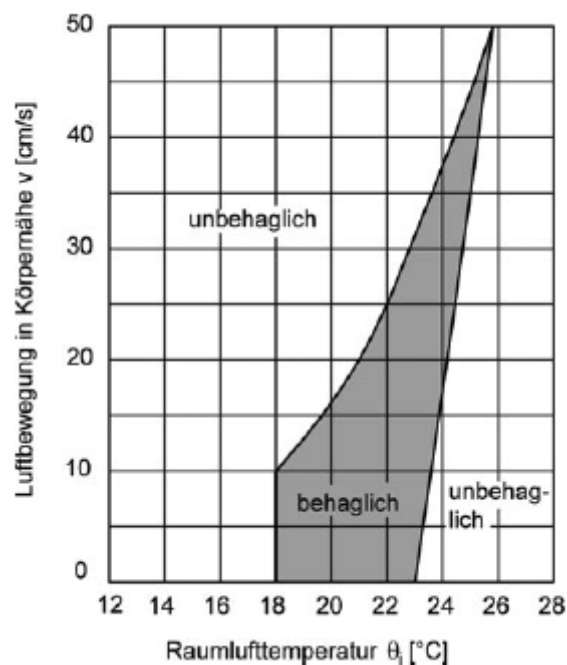


Abbildung C.4: Behaglichkeitsfelder für das Wertepaar Raumlufttemperatur/Luftgeschwindigkeit nach [22]

Anhang D: Dokumentationsgrafiken



Abbildung D.1: Energy Logger 400 und Schaltsteckdose (links), Access Point (Mitte), Heizstrahler (rechts)

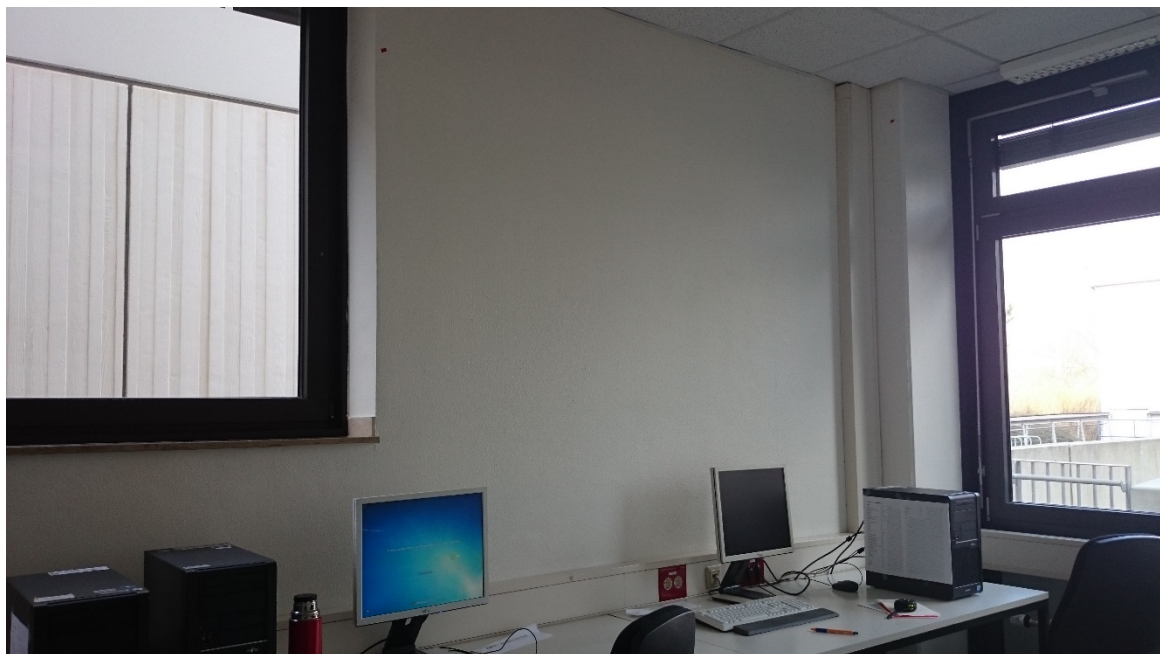
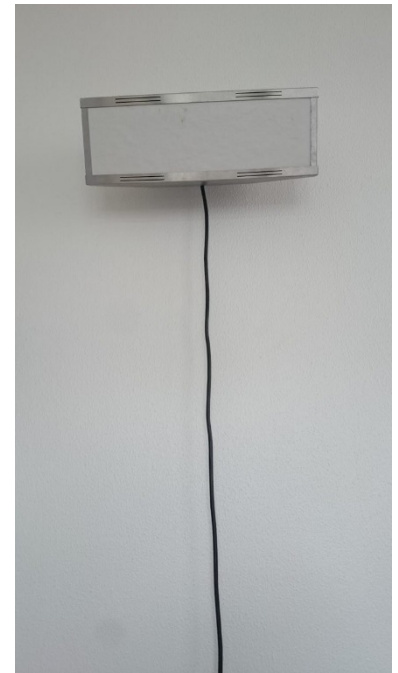


Abbildung D.2: Arbeitsplätze 2 und 3



Abbildung D.3: Fenster 2 (Ausrichtung Norden)

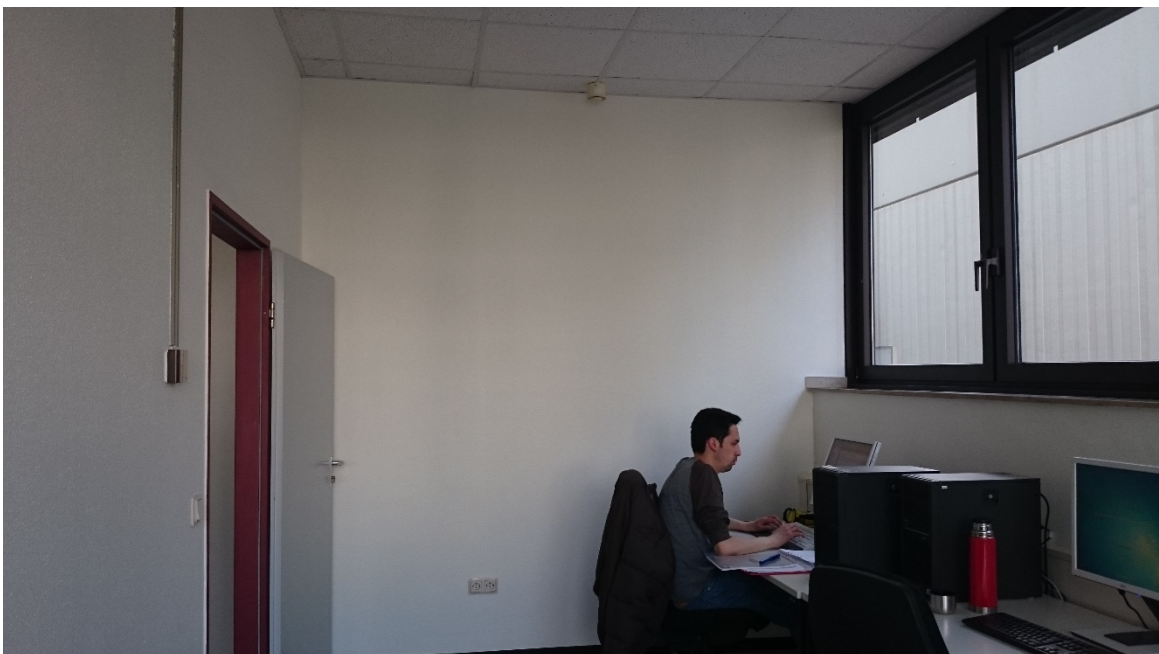


Abbildung D.4: Fenster 1 (Ausrichtung Westen), Arbeitsplätze 1 und 2

DATUM	UHRZEIT	
	VON	BIS
01.04.2016	11:00	19:37
04.04.2016	8:55	14:10
07.04.2016	10:00	19:00
05.04.2016	8:50	16:10
05.04.2016	17:00	18:00
05.04.2016	8:50	17:00
06.04.2016	10:40	16:45 16:45
06.04.2016	17:45	17:75
06.04.2016	11:30	17:15
06.04.2016	09:00	19:30
07.04.2016	08:30	17:10
08.04.2016	08:35	11:30
08.04.2016	08:50	12:05
08.04.2016	14:00	20:00
11.04.16	14:00	16:00
11.04.2016	09:00	18:00
12.04.2016	08:00	13:50
12.04.2016	8:50	17:10
13.04.2016	8:50	17:40
14.04.2016	8:50	16:10
14.04.2016	9:30	19:00
18.04.2016	8:50	16:30
19.04.2016	14:15	18:10

Abbildung D.5: Anwesenheitstabelle

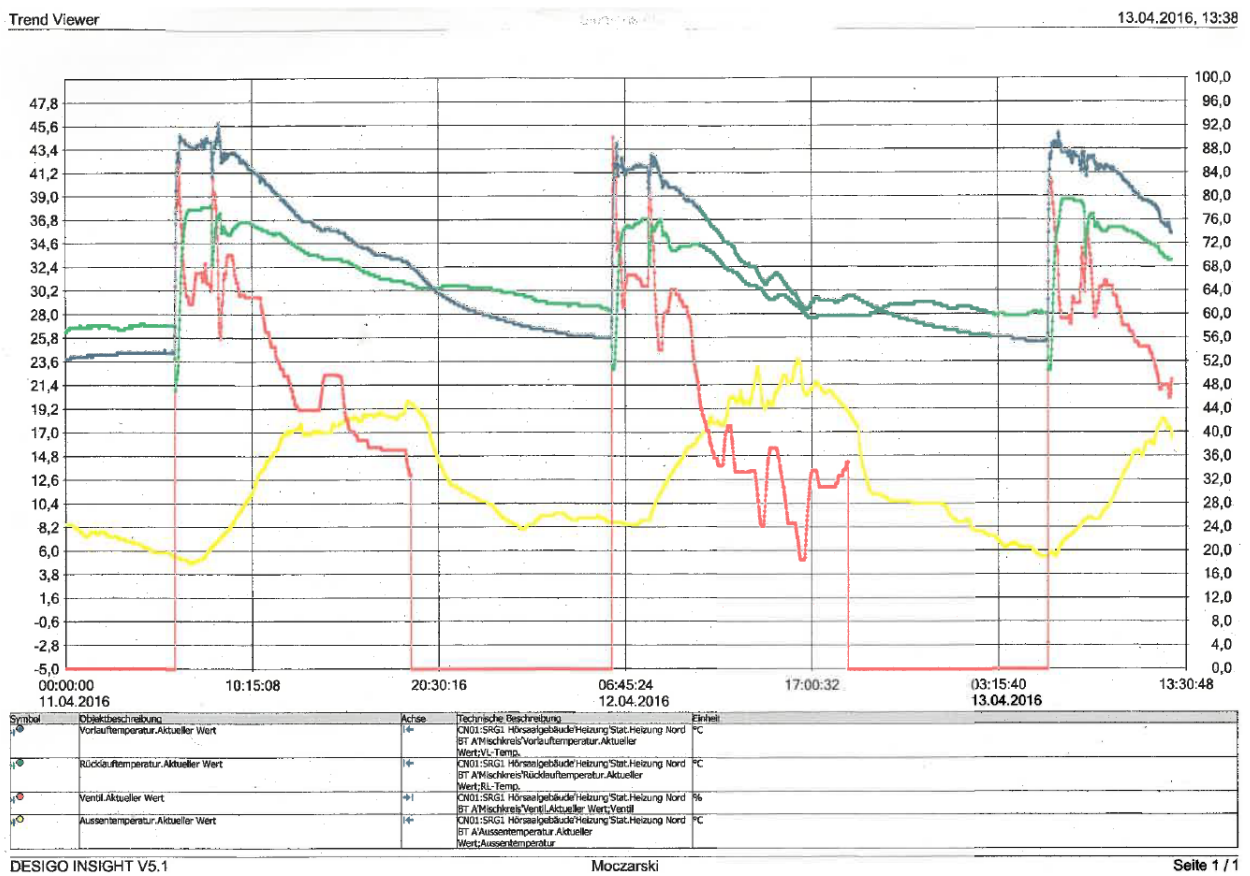


Abbildung D.6: Temperaturverlauf, aufgezeichnet von der Leitwarte der TU Dortmund

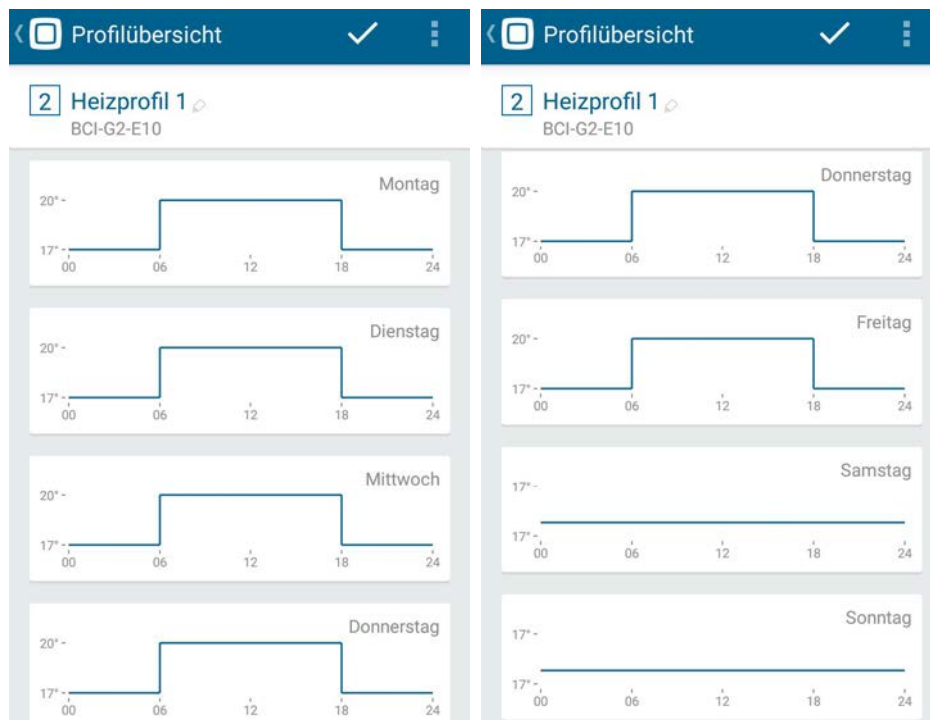


Abbildung D.7: Heizprofil 1 für Messung 4

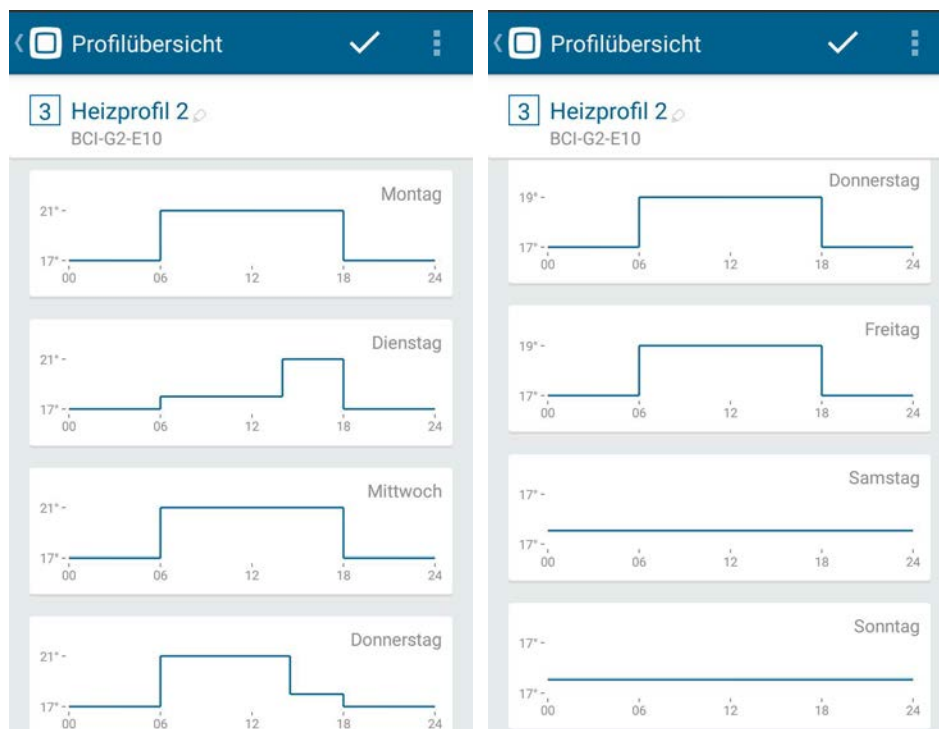


Abbildung D.8: Heizprofil 2 für Messung 8

Thermische Behaglichkeit im Büro

Bitte beantworten Sie alle Fragen, indem Sie das entsprechende Feld ankreuzen oder eine Zahl eintragen, falls dies gewünscht ist. Es sind nicht immer Mehrfachnennungen möglich. Wenn Sie sich für ein anderes als das von Ihnen bereits ausgewählte Feld entscheiden möchten, machen Sie dies bitte deutlich genug kenntlich.

Geschlecht

männlich weiblich

Temperaturempfinden (TSV)

Wie fühlen Sie sich jetzt?

kalt kühl leicht kühl neutral leicht warm heiß

Behaglichkeitsempfinden (CSV)

Momentan finde ich die Temperatur insgesamt...

behaglich leicht unbehaglich sehr unbehaglich intolerabel

Thermische Präferenz

Ich hätte es insgesamt lieber...

viel kälter keine Änderung viel wärmer

Thermische Behaglichkeit Kopf

Momentan finde ich die Temperatur am Kopf...

unbehaglich kühl
 behaglich
 unbehaglich warm

Thermische Behaglichkeit Füße

Momentan finde ich die Temperatur an den Füßen...

unbehaglich kühl
 behaglich
 unbehaglich warm

Temperaturänderung

Wurde eine Temperaturänderung wahrgenommen?

ja, deutlich
 kaum
 nein

Vergleich

Nutzen Sie in Ihrem Wohnsitz konventionelle Heizsysteme?

ja
 nein

Wenn ja: Im Vergleich zur konventionellen Heizmethode empfinde ich das Umgebungsklima als... (Mehrfachnennungen möglich)

behaglicher
 unbehaglicher
 zu warm
 zu kalt

sonstige Bemerkungen: (z.B. „Wärme nur im Rücken gefühlt, vordere Körperseite ist kühl geblieben“)

Abbildung D.9: Fragebogen 1 für Befragung 1

Thermische Behaglichkeit im Büro

Bitte beantworten Sie alle Fragen, indem Sie das entsprechende Feld ankreuzen oder eine Zahl eintragen, falls dies gewünscht ist. Es sind nicht immer Mehrfachnennungen möglich. Wenn Sie sich für ein anderes als das von Ihnen bereits ausgewählte Feld entscheiden möchten, machen Sie dies bitte deutlich genug kenntlich.

Geschlecht

männlich weiblich

Temperaturempfinden (TSV)

Wie fühlen Sie sich jetzt?

kalt kühl leicht kühl neutral leicht warm heiß

Behaglichkeitsempfinden (CSV)

Momentan finde ich die Temperatur insgesamt...

behaglich leicht unbehaglich sehr unbehaglich intolerabel

Thermische Präferenz

Ich hätte es insgesamt lieber...

viel kälter keine Änderung viel wärmer

Behaglichkeitsgefühl nach dem Lüften

Auf wie lange schätzen Sie die Zeit, bis sich nach dem Lüften eine angenehme Temperatur eingestellt hat?

min

Thermische Behaglichkeit Kopf

Momentan finde ich die Temperatur am Kopf...

unbehaglich kühl
 behaglich
 unbehaglich warm

Thermische Behaglichkeit Füße

Momentan finde ich die Temperatur an den Füßen...

unbehaglich kühl
 behaglich
 unbehaglich warm

Temperaturänderung

Wurde eine Temperaturänderung wahrgenommen?

ja, deutlich
 kaum
 nein

Vergleich

Nutzen Sie in Ihrem Wohnsitz konventionelle Heizsysteme?

ja
 nein

Wenn ja: Im Vergleich zur konventionellen Heizmethode empfinde ich das Umgebungsklima als... (Mehrfachnennungen möglich)

behaglicher
 unbehaglicher
 zu warm
 zu kalt

Abbildung D.10: Fragebogen 2 für Befragung 2 und 3

Anhang E: Datenblätter

BioHeatPlus - Technische Daten

- Wandgerät in pyramidenähnlicher Dreiecksform
- Gehäuse Edelstahl
- Frontplatte aus Keramik
- 3 Infrarot-Heizelemente
- Steuerung für Takt und Zyklus
- Überhitzungsschutz
- Porzellan Kabelklemmen
- in Deutschland patentierte Technik
- Made in Germany

Kenndaten:

Spannung	230 Volt
Strom max.	5,2 Ampere
Leistung max.	1.200 Watt
Verbrauch / Stunde	max. 311 Watt (Durchschnitt)
Schutzklasse	I
Oberflächentemperatur	ca. 140 °C
Abmessungen (BxHxT)	51 x 18 x 16 cm
Gewicht	4,8 kg



Geprüft nach:

EN 60335-1:2012+A11
EN 60335-2-30:2009+A11
AfPS GS 2014:01 Par. 3.1

Zertifikat Nummer: S 60108190

Garantie:

2 Jahre auf den BioHeatPlus
2 Jahre auf Raumthermostat und Funkschalter

Lieferumfang:

- BioHeatPlus
- Wandhalterung
- Raumthermostat (drahtlos) inkl. Batterien
- Funkschalter
- Montage- und Bedienungsanleitung
- EG-Konformitätserklärung



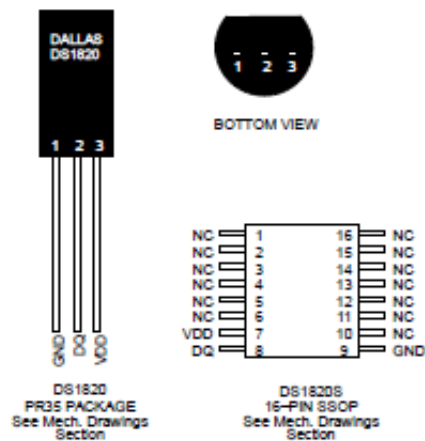
Abbildung E.1: Datenblatt der IR-Strahler [30]

DS1820

DALLAS
SEMICONDUCTOR
DS1820
 1-Wire™ Digital Thermometer

FEATURES

- Unique 1-Wire™ interface requires only one port pin for communication
- Multidrop capability simplifies distributed temperature sensing applications
- Requires no external components
- Can be powered from data line
- Zero standby power required
- Measures temperatures from -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ in 0.5°C increments. Fahrenheit equivalent is -67°F to $+257^{\circ}\text{F}$ in 0.9°F increments
- Temperature is read as a 9-bit digital value.
- Converts temperature to digital word in 200 ms (typ.)
- User-definable, nonvolatile temperature alarm settings
- Alarm search command identifies and addresses devices whose temperature is outside of programmed limits (temperature alarm condition)
- Applications include thermostatic controls, industrial systems, consumer products, thermometers, or any thermally sensitive system

PIN ASSIGNMENT

PIN DESCRIPTION

GND	- Ground
DQ	- Data In/Out
V _{DD}	- Optional V _{DD}
NC	- No Connect

DESCRIPTION

The DS1820 Digital Thermometer provides 9-bit temperature readings which indicate the temperature of the device.

Information is sent to/from the DS1820 over a 1-Wire interface, so that only one wire (and ground) needs to be connected from a central microprocessor to a DS1820. Power for reading, writing, and performing temperature conversions can be derived from the data line itself with no need for an external power source.

Because each DS1820 contains a unique silicon serial number, multiple DS1820s can exist on the same 1-Wire bus. This allows for placing temperature sensors in many different places. Applications where this feature is useful include HVAC environmental controls, sensing temperatures inside buildings, equipment or machinery, and in process monitoring and control.

©Copyright 1995 by Dallas Semiconductor Corporation.
 All Rights Reserved. For important information regarding
 patents and other intellectual property rights, please refer to
 Dallas Semiconductor data books.

021457 1/27

Abbildung E.2: Datenblatt der Sensoren, S.1

TYPICAL PERFORMANCE CURVE

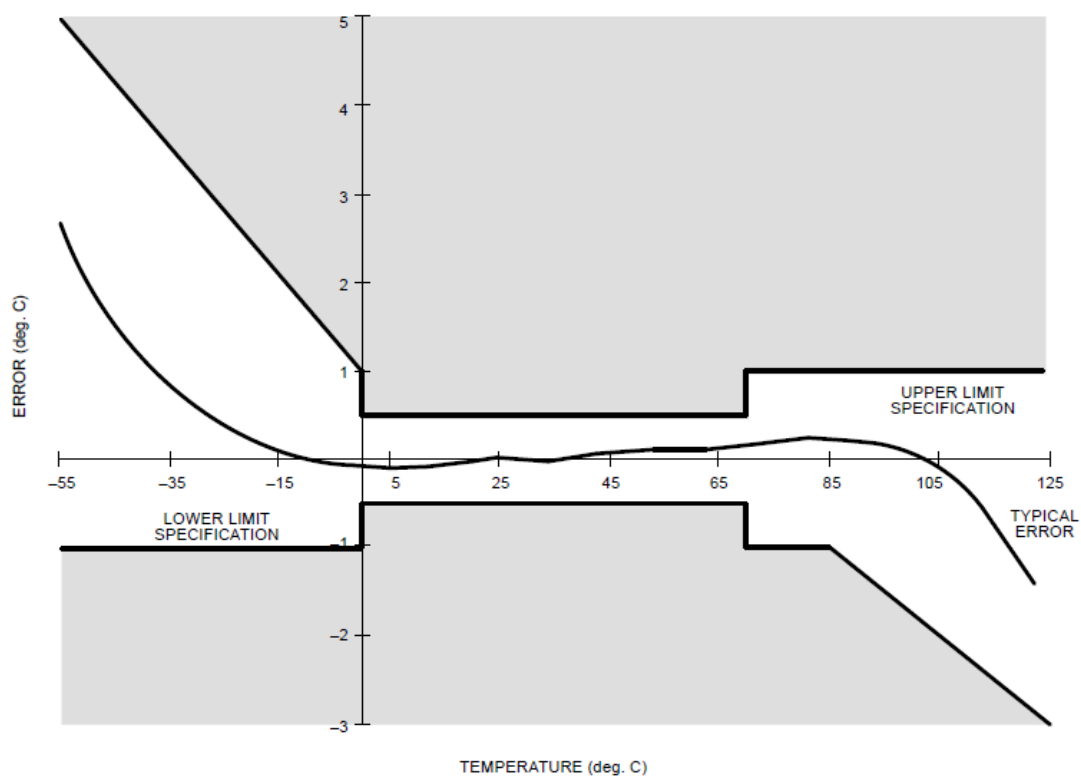
DS1820 DIGITAL THERMOMETER AND THERMOSTAT
TEMPERATURE READING ERROR

Abbildung E.3: Temperaturkurve der Sensoren

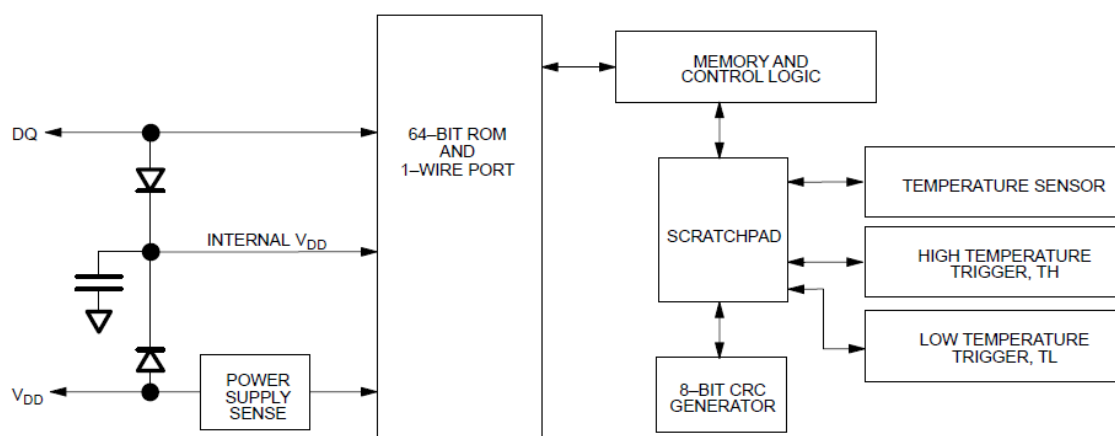


Abbildung E.4: Blockdiagramm aus dem Datenblatt der Sensoren

Eidesstattliche Versicherung

Busse, Hanna Iva

166916

Name, Vorname

Matr.-Nr.

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit/Masterarbeit* mit dem Titel

Evaluation der Energieeffizienz eines strombasierten IR-Heizsystems

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Dortmund, 06.06.2016

Hanna Busse

Ort, Datum

Unterschrift

*Nichtzutreffendes bitte streichen

Belehrung:

Wer vorsätzlich gegen eine die Täuschung über Prüfungsleistungen betreffende Regelung einer Hochschulprüfungsordnung verstößt, handelt ordnungswidrig. Die Ordnungswidrigkeit kann mit einer Geldbuße von bis zu 50.000,00 € geahndet werden. Zuständige Verwaltungsbehörde für die Verfolgung und Ahndung von Ordnungswidrigkeiten ist der Kanzler/die Kanzlerin der Technischen Universität Dortmund. Im Falle eines mehrfachen oder sonstigen schwerwiegenden Täuschungsversuches kann der Prüfling zudem exmatrikuliert werden. (§ 63 Abs. 5 Hochschulgesetz - HG -)

Die Abgabe einer falschen Versicherung an Eides statt wird mit Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Die Technische Universität Dortmund wird gfs. elektronische Vergleichswerkzeuge (wie z.B. die Software „turnitin“) zur Überprüfung von Ordnungswidrigkeiten in Prüfungsverfahren nutzen.

Die oben stehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Dortmund, 06.06.2016

Hanna Busse

Ort, Datum

Unterschrift